

2022

# SZ4D

PLAN DE  
IMPLEMENTACIÓN



# EQUIPO DE REDACCIÓN Y RECONFIGURACIÓN

## EDITOR PRINCIPAL

George Hilley . . . . . Stanford University

## AUTORES Y COLABORADORES

Emily Brodsky . . . . . University of California, Santa Cruz

Diana Roman . . . . . Carnegie Institution for Science

Donna Shillington . . . . . Northern Arizona University

Harold Tobin . . . . . University of Washington

Mark Behn . . . . . Boston College

Mike Brudzinski. . . . . Miami University of Ohio

Geoff Abers . . . . . Cornell University

Colin Amos. . . . . Western Washington University

Kyle Anderson . . . . . US Geological Survey

Pete Barry . . . . . Woods Hole Oceanographic Institution

Beth Bartel . . . . . Michigan Tech University

Noel Bartlow . . . . . University of Kansas

Susan Beck . . . . . University of Arizona

Thorsten Becker . . . . . University of Texas, Austin

Magali Billen . . . . . University of California, Davis

Ben Black. . . . . The City College of New York

Danny Brothers. . . . . US Geological Survey

Claire Bucholz . . . . . California Institute of Technology

Roland Bürgmann . . . . . University of California, Berkeley  
 Jackie Caplan-Auerbach . . . . . Western Washington University  
 Simon Carn. . . . . Michigan Tech  
 Chuck Connor . . . . . University of South Florida  
 Michele Cooke . . . . . University of Massachusetts Amherst  
 Juliet Crider . . . . . University of Washington  
 Stephen DeLong . . . . . US Geological Survey  
 Eric Dunham . . . . . Stanford University  
 Alison Duvall . . . . . University of Washington  
 Noah Finnegan. . . . . University of California, Santa Cruz  
 William Frank. . . . . Massachusetts Institute of Technology  
 Andy Frassetto . . . . . IRIS Incorporated Research Institutions for Seismology  
 Melodie French . . . . . Rice University  
 Alice Gabriel . . . . . LMU Munich/University of California, San Diego  
 Sean Gallen . . . . . Colorado State University  
 Esteban Gazel . . . . . Cornell University  
 Joan Gomberg . . . . . US Geological Survey  
 Helge Gonnermann . . . . . Rice University  
 Karen Gran . . . . . University of Minnesota Duluth  
 Trish Gregg. . . . . University of Illinois  
 Matt Haney. . . . . US Geological Survey  
 Karen Hill. . . . . US Geological Survey  
 George Hilley . . . . . Stanford University  
 Mong-Han Huang . . . . . University of Maryland  
 Chris Huber . . . . . Brown University  
 Shaul Hurwitz. . . . . US Geological Survey  
 Kaj Johnson . . . . . Indiana University, Bloomington  
 Leif Karlstrom. . . . . University of Oregon  
 Adam Kent . . . . . Oregon State University  
 Eric Kirby . . . . . Oregon State University  
 Eric Kiser . . . . . University of Arizona  
 Jared Kluesner . . . . . US Geological Survey  
 Nicole LaDue. . . . . Northern Illinois University  
 Pete LaFemina . . . . . Pennsylvania State University

Thorne Lay . . . . . University of California, Santa Cruz  
 Jeff McGuire . . . . . US Geological Survey  
 Kristin Morell . . . . . University of California, Santa Barbara  
 Yves Moussallam . . . . . Lamont-Doherty Earth Observatory  
 Carolina Muñoz-Saez. . . . . University of Nevada Reno  
 Madison Myers. . . . . Montana State University  
 Samer Naif . . . . . Lamont-Doherty Earth Observatory/GeorgiaTech  
 Andrew Newman. . . . . Georgia Tech  
 Nathan Niemi . . . . . University of Michigan  
 Anne-Marie Núñez . . . . . Ohio State University  
 Summer Ohlendorf. . . . . NOAA/National Tsunami Warning Center  
 Ayla Pamukcu . . . . . Stanford University  
 Charlie Paul . . . . . Monterey Bay Aquarium Research Institute  
 Jon Perkins . . . . . US Geological Survey  
 Terry Plank . . . . . Lamont-Doherty Earth Observatory  
 Beth Pratt-Sitaula. . . . . UNAVCO  
 Christine Regalla . . . . . Northern Arizona University  
 Demian Saffer . . . . . University of Texas Institute for Geophysics  
 Steven Semken. . . . . Arizona State University  
 Joann Stock . . . . . California Institute of Technology  
 Danielle Sumy . . . . . IRIS Incorporated Research Institutions for Seismology  
 Amanda Thomas . . . . . University of Oregon  
 Christy Till . . . . . Arizona State University  
 Aaron Velasco . . . . . University of Texas El Paso  
 Daniel Viete . . . . . Johns Hopkins University  
 Ikuko Wada. . . . . University of Minnesota  
 Janet Watt . . . . . US Geological Survey  
 Rick Wessels . . . . . US Geological Survey  
 Lisa White . . . . . University of California, Berkeley  
 Doug Wiens . . . . . Washington University  
 Rob Witter . . . . . US Geological Survey  
 Heather Wright. . . . . US Geological Survey  
 Brian Yanites . . . . . Indiana University  
 Wenlu Zhu . . . . . University of Maryland

## EDICIÓN Y PRODUCCIÓN

Ellen Kappel . . . . . Editing, Geosciences Professional Services Inc.  
Anaïs Férot . . . . . Producción, SZ4D UC Santa Cruz

## CITA PREFERIDA

Hilley, G. E. (ed.), Brodsky, E.E., Roman, D., Shillington, D. J., Brudzinski, M., Behn, M., Tobin, H. and the SZ4D RCN (2022). SZ4D Implementation Plan. Stanford Digital Repository. Disponible en <https://purl.stanford.edu/hy589fc7561>. <https://doi.org/10.25740/hy589fc7561>

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos las contribuciones intelectuales de los 3400 participantes en las actividades de SZ4D entre 2020 y 2022. El generoso y profundo compromiso de la comunidad ha creado este plan durante algunos de los años más difíciles de nuestras vidas personales y profesionales. Los esfuerzos de SZ4D se han apoyado en virtud de las becas de NSF [EAR-1828096](#), [EAR-1824343](#) y [EAR-2221947](#). Este documento es el informe final tanto del SZ4D de la Red de Coordinación de Investigación (RCN) como del MCS RCN, que fueron respaldados por los dos primeros premios.



Este documento se publicó en noviembre de 2022

Contáctenos a través de [contact@sz4d.org](mailto:contact@sz4d.org); [www.sz4d.org](http://www.sz4d.org)

# CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO. . . . .	8
----------------------------	---

1 INTRODUCCIÓN . . . . .	15
--------------------------	----

2 TEMAS CIENTÍFICOS INTERSECTORIALES . . . . .	22
--	----

## GRUPOS DE TRABAJO

3.1 CICLOS DE FALLAS Y TERREMOTOS . . . . .	32
---	----

3.2 RELIEVES TERRESTRES Y RELIEVES MARINOS . . . . .	62
--	----

3.3 DESENCADENANTES MAGMÁTICOS DE ERUPCIONES . . . . .	87
--	----

## GRUPOS INTEGRADORES

4.1 DESARROLLO DE EQUIDAD Y CAPACIDAD GEOCIENTÍFICA . . . . .	118
---	-----

4.2 MODELADO COLABORATIVO PARA LA SUBDUCCIÓN . . . . .	140
--	-----

## SÍNTESIS

5.1 GEOGRAFÍA. . . . .	151
------------------------	-----

5.2 SINERGIAS TÉCNICAS Y DE DATOS . . . . .	161
---	-----

5.3 FASES. . . . .	166
--------------------	-----

5.4 ESTRUCTURA Y GOBERNANZA DEL PROGRAMA . . . . .	169
--	-----

A. APÉNDICES . . . . .	176
------------------------	-----

# SZ4D

PLAN DE IMPLEMENTACIÓN

2022



# RESUMEN EJECUTIVO

## FUNDAMENTO CIENTÍFICO Y SOCIAL

**Las Zonas de Subducción en Cuatro Dimensiones (SZ4D)**, son una nueva iniciativa científica interdisciplinaria multidécada e impulsada por la comunidad que se esfuerza por comprender cómo interactúan los diferentes componentes de los sistemas de zonas de subducción para producir y ampliar los peligros geológicos con el tiempo. Aborda las principales brechas en nuestra comprensión de los peligros geológicos aprovechando la disponibilidad de nuevas técnicas de observación, analíticas y computacionales y coordinando la investigación fundamental sobre las características y procesos físicos y químicos en las zonas de subducción. Las zonas de subducción ofrecen la oportunidad de investigar estratégicamente los peligros integrados simultáneamente y realizar experimentos naturales bien controlados que se pueden utilizar para aislar y estudiar factores clave que impulsan los peligros geológicos. Una piedra angular de SZ4D es reunir a científicos con una amplia gama de orígenes geocientíficos y conjuntos de habilidades que estudian terremotos, erupciones volcánicas y procesos superficiales.

Los principales peligros geológicos de la Tierra se concentran en zonas de subducción, lugares donde una placa tectónica se desliza por debajo de otra. Los terremotos y los tsunamis pueden causar devastación a enormes escalas, alterando así a toda la sociedad. Las grandes erupciones volcánicas han destruido repetidamente ciudades y alterado los patrones climáticos a lo largo de la historia de la humanidad, lo que ha provocado pérdida de cultivos, hambruna y disminución y migración de la población. Los deslizamientos de tierra, los flujos de detritos y las inundaciones han arrasado pueblos y aldeas de montaña, alterado la agricultura, cortado las rutas de transporte y afectado profundamente por igual a las poblaciones urbanas y rurales. A pesar de la ambición global de pronosticar estos peligros geológicos, solo tenemos una comprensión limitada de los complejos procesos físicos y químicos que interactúan para desencadenar terremotos, tsunamis y erupciones volcánicas. También tenemos una comprensión limitada de las muchas formas en las que estos peligros geológicos están vinculados a los procesos de la superficie terrestre, como la erosión y el depósito de sedimentos.

Hasta la fecha, el progreso en la comprensión de la previsibilidad potencial de los peligros geológicos no solo se ha visto limitado por vacíos persistentes de conocimiento, sino que se ha visto obstaculizado por estudios que históricamente se han realizado dentro de límites disciplinares. Sin embargo, hay temas intersectoriales obvios y compartidos que vinculan los estudios de zonas de subducción, lo que sugiere que un enfoque interdisciplinario impulsaría significativamente la ciencia.

Este documento proporciona los detalles de cómo la comunidad científica implementará SZ4D a lo largo de la vida útil decenal de la iniciativa. Describe los componentes de observación, experimentales y numéricos necesarios para capturar el rango de escalas espaciales y temporales sobre las que operan los procesos de zona de subducción y la inversión significativa y sostenida en infraestructura humana y física

necesaria para respaldar este esfuerzo. Utilizando un modelo de impacto colectivo, los científicos coordinarán estrechamente su investigación en todas las disciplinas y aprovecharán los esfuerzos existentes para que las nuevas actividades se basen en apoyos de éxitos pasados. Para permitir una estrecha integración y fases dentro y entre los componentes de este plan de implementación, un centro coordinará el despliegue de recursos humanos e instrumentales, mientras que los investigadores individuales también tendrán la capacidad de ser creativos a través de un programa científico de SZ4D dedicado. Con la participación de una comunidad diversa de científicos y partes interesadas en este esfuerzo de SZ4D, estamos preparados para dar un gran paso adelante en nuestra comprensión de los peligros de la zona de subducción para el beneficio de la sociedad.

## DESARROLLO DEL PLAN DE IMPLEMENTACIÓN

SZ4D está compuesto por 74 representantes miembros de comunidades de investigación de los EE. UU. que estudian terremotos, erupciones volcánicas y procesos superficiales en zonas de subducción.

SZ4D se organiza en:

### TRES GRUPOS DE TRABAJO

Relieves terrestres y relieves marinos (L&S)

Ciclos de fallas y terremotos (FEC)

Desencadenantes magmáticos de erupciones (MDE)

### DOS GRUPOS INTEGRADORES

Desarrollo de equidad y capacidad geocientífica (BECG)

Modelado colaborativo para la subducción (MCS)

A través de una combinación de reuniones, talleres, seminarios web y asambleas, SZ4D ha involucrado a más de 3400 participantes que han identificado en colaboración prioridades comunitarias y observaciones y mediciones clave que permitirán los avances científicos necesarios para comprender mejor los peligros geológicos con el fin de mitigar sus riesgos para la sociedad. El **plan de implementación de SZ4D** es el producto inicial de estas discusiones.

Los **grupos de trabajo** y los **grupos integradores** sintetizaron las aportaciones de la comunidad e identificaron preguntas clave que la iniciativa de SZ4D debe abordar:

- ¿Cuándo y dónde se producen grandes terremotos dañinos?
- ¿Cómo inician los procesos transcorticales las erupciones en los arcos volcánicos?
- ¿Cómo generan y transportan sedimentos los eventos dentro de la atmósfera, la hidrósfera y la tierra sólida a través de relieves terrestres y relieves marinos de la zona de subducción?
- ¿Qué fracción del balance energético de una zona de subducción se destina a crear y dar forma a la zona de subducción de relieves terrestres y marinos?
- ¿Cómo podemos transformar la mentalidad de nuestra comunidad para adoptar la educación, la difusión, la accesibilidad, las asociaciones internacionales, la diversidad, la equidad, la inclusión y las ciencias sociales como componentes fundamentales para el éxito de las geociencias?

A partir de estas preguntas surgen varios temas intersectoriales. Todos los estudios de peligros geológicos se esfuerzan por establecer las circunstancias bajo las cuales se pueden pronosticar eventos catastróficos, si estas circunstancias realmente existen o se pueden medir. La ocurrencia de grandes terremotos, erupciones volcánicas y deslizamientos de tierra reflejan la forma en que la masa y la energía se introducen, equilibran y transfieren dentro de las zonas de subducción. El estrés que refleja estas entradas de masa y energía dan lugar a movimientos que dependen de la reología de los materiales de la Tierra, ya sea dentro de la tierra sólida, cerca de la superficie o parte de la atmósfera. Los fluidos, y cómo migran a través del sistema terrestre, son determinantes clave de dónde, cuándo y cómo se producirán grandes deslizamientos de tierra, erupciones volcánicas y terremotos. El cambio climático y la variabilidad pueden alterar las cargas superficiales que influyen en el transporte de fluidos volcánicos, el estrés dentro de la corteza y la hidrología cerca de la superficie que puede desencadenar deslizamientos de tierra. Por último, los peligros geológicos no se producen aislados entre sí, pero pueden desencadenarse y resultar en una cascada de otros peligros que pueden amplificar el impacto de estos fenómenos.

## REQUISITOS DE INFRAESTRUCTURA

Para responder a las preguntas científicas clave planteadas por SZ4D, es necesario recopilar un conjunto diverso de observaciones a una serie de escalas temporales y espaciales tanto en tierra como bajo el mar (**Figura ES-1**). Tres componentes clave de la infraestructura de SZ4D in situ hacen posible esta recopilación de datos:

1. **MegaArray** | Una red instrumental central a gran escala y a largo plazo de instrumentos geodésicos y sísmicos *anfíbios* (es decir, que integran a la perfección observaciones terrestres y marinas) densificados en áreas clave
2. **VolcArray** | Una red instrumental volcánica estandarizada multicomponente
3. **SurfArray** | Conjunto de redes instrumentales de detección de cambios en la superficie y el entorno que capturan imágenes de los cambios en el subsuelo poco profundo de la Tierra, la superficie y las condiciones atmosféricas

Aunque las redes instrumentales primarias proporcionarán nuevas restricciones en diferentes facetas del comportamiento de la zona de subducción, **se requieren esfuerzos adicionales de observación, experimentales y de modelado, así como programas de desarrollo humano, para contextualizar y explicar ese comportamiento; cada uno de**

**estos componentes tiene necesidades de infraestructura asociadas.** Para este esfuerzo es esencial la infraestructura computacional proporcionada por el grupo integrador MCS, que permitirá a la comunidad integrar los resultados de las redes instrumentales y otras actividades, lo que dará como resultado un retrato de las zonas de subducción en el espacio y el tiempo.

Para fomentar un cambio cultural en los esfuerzos de investigación y garantizar que los resultados se comuniquen a las comunidades afectadas por los peligros geológicos, el grupo integrador de BECG desarrolló un conjunto completo de actividades para que la comunidad de SZ4D las implemente. Estos esfuerzos pueden habilitarse bajo un modelo de impacto colectivo que haga hincapié en las actividades de alta prioridad, que incluyen el establecimiento de asociaciones y coordinación sostenidas que permitirán el cambio social a través de comunidades de práctica y el trabajo objetivo de los investigadores principales (PI) de BECG hacia áreas con el máximo impacto.

## IMPLEMENTACIÓN POR FASES Y CRONOGRAMA PREVISTO

Todos los componentes de SZ4D destacan la importancia de las fases, en los que estas últimas se basan en la información generada por fases anteriores. La fase propuesta de las actividades de cada grupo de trabajo e integrador tiene un cronograma diferente. La MegaArray y las imágenes geofísicas asociadas y la caracterización geológica comenzarán a gran escala y pasados cinco años procederán a identificar áreas objetivo clave que justifiquen un estudio centrado y redes instrumentales densificadas. VolcArray primero desarrollará y probará redes instrumentales en algunos volcanes y luego se expandirá a una cartera de aproximadamente 30 sistemas activos para observaciones a largo plazo y seis sistemas clave para estudios densos. Los investigadores de relieves terrestres y relieves marinos adoptarán

un enfoque similar con SurfArray, pero se dirigirán hacia una comparación cuidadosamente diseñada de ubicaciones emparejadas para diferenciar procesos clave. En paralelo a los esfuerzos de observación, los esfuerzos de modelado y experimentales también seguirán un enfoque por fases para la asimilación de datos, el desarrollo del flujo de trabajo y la recopilación de datos centrales. La coordinación de la fase entre los esfuerzos de observación, experimentales y numéricos es necesaria para integrar los resultados, para informar de la planificación de las fases futuras y para responder a las preguntas de investigación de SZ4D. En resumen, la sincronización de todos los componentes de SZ4D debe realizarse de forma gradual de forma que los diferentes componentes interdependientes puedan ejecutarse sin problemas durante la vida útil de SZ4D.

## SITIOS GEOGRÁFICOS

Los grupos de trabajo e integradores de SZ4D evaluaron sistemáticamente las características de las zonas de subducción del mundo para determinar si un esfuerzo centrado en una o más regiones permitiría a los investigadores responder a preguntas científicas de SZ4D. Los grupos también reconocieron el imperativo de una iniciativa financiada por los EE. UU. para contribuir sustancialmente a cubrir las brechas de conocimiento fundamentales que afectan al riesgo nacional y a la mitigación de peligros. Después de considerar las necesidades de todas las comunidades representadas por los grupos de trabajo e integradores en su conjunto, SZ4D reconoció que las comparaciones centradas entre las zonas de subducción internacionales y nacionales ofrecían las mejores oportunidades para abordar las preguntas científicas clave. Chile, Cascadia y Alaska fueron reconocidos como lugares ideales para los esfuerzos de SZ4D. La zona de subducción chilena es lo suficientemente activa desde el punto de vista geológico como para proporcionar información útil durante un despliegue científico, es altamente accesible con una infraestructura científica e intelectual significativa en vigor

en un solo país asociado y tiene regiones que forman importantes estudios comparativos para nuestros centros nacionales. Los grupos recomiendan implementar ~70 % de los esfuerzos de instrumentación en Chile, ~20 % en Cascadia y ~10 % en Alaska. Los grupos también reconocen que las actividades científicas asociadas, como los estudios geológicos, el modelado, los experimentos de laboratorio y la creación de equidad y capacidad, están adecuadamente equilibradas de forma diferente. Los grupos recomiendan una cartera de ~50 % de actividades en Chile, ~40 % en Cascadia y ~10 % en Alaska. Se necesitan comparaciones globales con otras zonas de subducción para generalizar los resultados de estas ubicaciones, y esto se puede lograr de forma más efectiva y significativa mediante el desarrollo de una red científica internacional que aproveche los esfuerzos paralelos de otros países. Desarrollar sólidas asociaciones internacionales a nivel mundial con proyectos complementarios a menor escala proporcionaría la diversidad de participación y la gama de procesos de zona de subducción necesarios para crear una visión generalizada de los peligros geológicos de la zona de subducción.

## ORGANIZACIÓN Y GOBERNANZA DE SZ4D

La implementación de SZ4D requiere inversión en varias áreas clave, algunas de las cuales existen actualmente, y otras que deben desarrollarse, combinarse o aumentarse. La primera, una estructura de gestión central, llamada **centro de SZ4D**, coordinará las diferentes instalaciones existentes y nuevas responsables de la gran mayoría de la recopilación de datos, facilitará la integración científica de SZ4D y coordinará estos elementos con socios y partes interesadas para maximizar el impacto colectivo de los esfuerzos de SZ4D. El centro sería supervisado por un Comité Directivo del Centro, cuyos miembros serán elegidos por un proceso abierto supervisado por el grupo de BECG de modo que la diversidad, la equidad y la inclusión sean el centro del proceso. La segunda área clave de inversión abarca cinco instalaciones nuevas y existentes.

1. **Instrumentación marina**, incluidas MegaArray y SurfArray. Esta nueva instalación proporcionará soporte dedicado para grupos de instrumentos sísmicos y geodésicos, recopilación de batimetría de alta resolución y otros datos de imágenes geofísicas, equipos de ingeniería operativa y buques marinos (tripulados y autónomos) para el despliegue, el servicio y la respuesta rápida cerca de los sitios de despliegue denso.
2. **Redes instrumentales en tierra**, incluido el componente de VolcArray, SurfArray y MegaArray. Las instalaciones actuales pueden, en parte, aprovecharse para satisfacer las necesidades del grupo de instrumentación terrestre.
3. Logística para la recogida de muestras, instrumentación y programas de campo que implican **despliegues humanos** como instrumentos de observación principales para recopilar datos sistemáticos y estandarizados, incluida la paleosismología, mapeo de estructuras, muestras para geocronología, geoquímica y petrología. Imaginamos una instalación que incluya una estación de campo que pueda apoyar la logística de campo, las adquisiciones de imágenes y la autorización, el archivado y el transporte de muestras.
4. Un **modelado colaborativo**. Esta instalación desarrollaría nuevos modelos físicos de zona de subducción y herramientas computacionales que aprovechen los avances en aprendizaje automático para la ciencia basada en datos, así como proporcionar recursos para su uso por parte de toda la comunidad de investigación SZ4D, incluidos estudiantes, postdoctorandos e investigadores.
5. Un **Consortio de Laboratorio y Muestras**. Este consorcio permitiría el estudio de las propiedades de los materiales, la reología durante la deformación y el equilibrio de fases de los sistemas fundidos.

El componente final de la Iniciativa de SZ4D es un **Programa de Ciencias** de la Fundación Nacional de Ciencias que identifica y permite la investigación científica emergente más importante relacionada con SZ4D utilizando un mecanismo de revisión de paneles basado en méritos. La comunicación regular entre el programa científico y el Comité Directivo del Centro de SZ4D ayudaría a coordinar la recopilación de datos e identificar prioridades científicas durante todo el programa. El enfoque de tres componentes definido aquí, un Centro, Instalaciones y Programa de Ciencias, maximizará el impacto científico y social de la iniciativa de SZ4D y ayudará a formar a la próxima generación de investigadores geocientíficos multipeligros.

## PERSPECTIVA

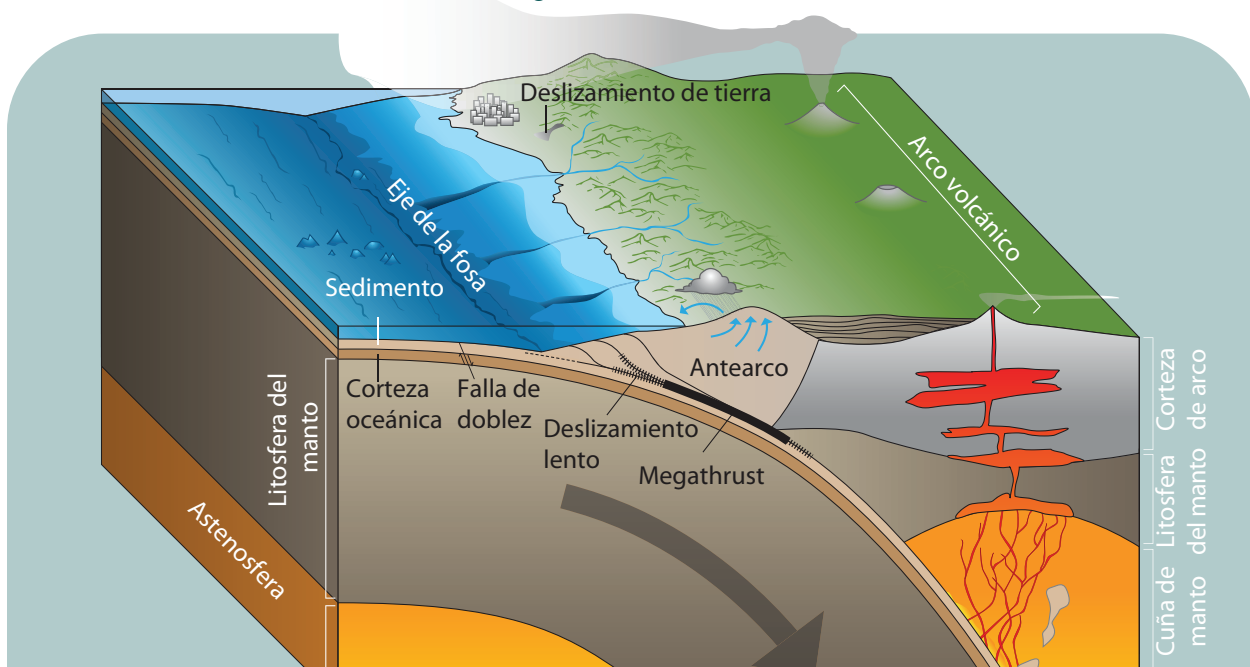
SZ4D está preparado para realizar importantes avances en la comprensión de la ciencia detrás de los peligros de la zona de subducción mediante la implementación estratégica de nuevos instrumentos en pares de zonas de subducción, el desarrollo de modelos más sofisticados y precisos utilizando avances en computación, la coordinación de la amplitud de la investigación de peligros geológicos utilizando un enfoque de impacto colectivo e la integración de una comunidad diversa de científicos y partes interesadas que aportarán una amplia gama de habilidades, conocimientos e ideas a este esfuerzo. Para tener éxito, este esfuerzo colaborativo a largo plazo requiere una estrecha coordinación entre todos los componentes y una profunda integración a lo largo del programa, comenzando en sus primeras fases. Alcanzar los objetivos de SZ4D no solo proporcionará nuevos conocimientos de los procesos físicos y químicos en el trabajo en las zonas de subducción, sino que también puede proporcionar beneficios tangibles a las comunidades que viven en regiones afectadas por los peligros de las zonas de subducción.

**Figura ES-1.** Esquema de las principales redes instrumentales y actividades de SZ4D. (Katy Cain/ Carnegie Institution for Science)



## BARRA LATERAL 1

¿Qué es una zona de subducción?



**Figura S1-1.** Representación de un sistema de subducción, que identifica muchos de los componentes analizados en este documento. Se crea una zona de subducción donde convergen dos placas, con una hundiéndose en el manto. La subducción conecta características de la placa entrante a la dinámica a lo largo de la interfaz de la placa que crean terremotos: generación de magma sobre la losa en hundimiento a erupciones explosivas, y creación de topografía en la placa superior a deslizamientos de tierra y sedimentos que se alimentan de nuevo a la zona de subducción. Figura recuperada del **documento de visión de SZ4D**

En las zonas de subducción, convergen dos placas tectónicas y una se empuja debajo de la otra. Estos ajustes presentan profundos peligros geológicos. Los terremotos más grandes de la Tierra se generan en el contacto entre estas dos placas tectónicas, y el movimiento resultante en el fondo marino desencadena grandes tsunamis. Las cadenas de volcanes activos se forman a lo largo de las zonas de subducción, muchos de los cuales son capaces de generar erupciones explosivas. Estos entornos activos sísmica y volcánicamente crean relieves dinámicos que pueden producir deslizamientos de tierra catastróficos. Los grandes centros de población de todo el mundo se encuentran a lo largo de zonas de subducción y, por lo tanto, se exponen inmediatamente a los peligros que representan, incluso dentro de los Estados Unidos. El noroeste del Pacífico sufrió un terremoto a escala del terremoto de Tōhoku de 2011 hace 323 años y es capaz de albergar terremotos futuros de este tamaño. La próxima erupción importante del monte Rainier tiene el potencial de devastar los principales centros urbanos del estado de Washington. Los grandes deslizamientos de tierra, como el evento de 2014 cerca de Oso, Washington, son algo común en el noroeste del Pacífico, Alaska y Puerto Rico. Aún más personas son vulnerables a los efectos de campo lejano de los peligros de la zona de subducción, como se ilustra dolorosamente por el tsunami producido por el terremoto de Sumatra M9.1 de 2004. A pesar de la enorme importancia social de estos peligros para muchos, los procesos físicos y químicos básicos que controlan la ocurrencia y magnitud de estos eventos naturales siguen siendo poco conocidos. El propósito de SZ4D es proporcionar una nueva perspectiva transformadora de los controles sobre los procesos fundamentales subyacentes a estos peligros.

# INTRODUCCIÓN



## JUSTIFICACIÓN DE UNA INICIATIVA DE SZ4D

Los peligros geológicos más devastadores de la Tierra se producen a lo largo de las zonas de subducción. Dentro de estos estrechos cinturones costeros, la energía se concentra principalmente a lo largo de fallas continuas que pueden extenderse más de mil kilómetros y son capaces de albergar grandes terremotos. Los volcanes que pueden arrojar cenizas y gases nocivos de decenas de kilómetros a la atmósfera se elevan paralelos a la fosa, y el terreno empinado e inestable que se extiende cientos de kilómetros tierra adentro puede desencadenar eventos de destrucción masiva. Estos peligros geológicos suponen un riesgo significativo para los centros de población humana, desde pequeñas comunidades costeras hasta grandes ciudades.

Aunque tenemos una comprensión limitada de los procesos físicos y químicos que controlan la ocurrencia, el momento y la magnitud de los peligros de la zona de subducción, los nuevos datos y técnicas prometen un progreso significativo. En las últimas dos décadas, los datos batimétricos, sísmicos, geodésicos, geoquímicos y de detección remota han revelado una rica gama de procesos de deslizamiento durante un ciclo sísmico, nuevos precursores de erupción volcánica, patrones espaciales detallados de deslizamientos de tierra activados por terremotos y una serie de nuevos procesos geomórficos en relieves terrestres y relieves

marinos. Estos avances proporcionan una oportunidad sin igual para organizar un esfuerzo integral, multidisciplinario y coordinado para recopilar observaciones, realizar experimentos de laboratorio y desarrollar modelos que mitigarían significativamente el riesgo de peligros geológicos al permitir que los eventos catastróficos se coloquen en un contexto físico completamente tetradimensional. **Las zonas de subducción en cuatro dimensiones, o SZ4D**, son una iniciativa impulsada por la comunidad para estudiar los lugares donde convergen las placas tectónicas de la Tierra, centrándose en comprender los procesos físicos y químicos que controlan la ocurrencia y magnitud de terremotos significativos, tsunamis, erupciones volcánicas y movimientos masivos en la superficie de la Tierra (**Figura I-1**).

Debido a su geometría única y distribución global, las zonas de subducción proporcionan entornos naturales ideales para aislar los procesos que controlan la variabilidad del comportamiento de peligro geológico. Los procesos físicos y químicos interrelacionados que se producen cuando una placa tectónica desciende por debajo de otra definen y, en última instancia, controlan las expresiones superficiales de terremotos, volcanes, tsunamis y deslizamientos de tierra. Con una profundidad creciente, las variaciones de temperatura y presión ejercen un control de primer orden en

los procesos de peligros geológicos. Del mismo modo, las variaciones laterales identificables a lo largo de la zona de subducción se manifiestan en las diferencias en los peligros geológicos. Estas variaciones laterales van desde las esperadas, como las variaciones en la tasa de convergencia de la placa, que corresponde al número, tamaño y ocurrencia de terremotos y erupciones, hasta las sutiles, como las variaciones en la tasa de erosión terrestre que pueden influir en la generación de magmas y las ubicaciones de los volcanes. Dicha variabilidad a gran escala y a largo plazo proporciona condiciones iniciales y límite críticas para peligros geológicos que pueden evaluarse en modelos numéricos.

Este **Plan de implementación de SZ4D** es el resultado de un esfuerzo sostenido por parte de los miembros de la red de coordinación de investigación (RCN) del marco de SZ4D y el Modelado colaborativo para la subducción de RCN. El plan identifica los condicionantes científicos generales del siguiente nivel de esfuerzo de investigación en la subducción de terremotos y generación de tsunamis, los procesos magmáticos que conducen a la erupción de arcos volcánicos y los movimientos de masas y distribución de energía que impulsan los procesos superficiales que conducen a fallas en las pendientes, flujos de detritos y otros eventos catastróficos en tierra y bajo el mar. Este documento establece un conjunto de observaciones y experimentos principales esenciales que abordarían cada pregunta científica y formarían parte de un programa de investigación sostenido en ubicaciones geográficas clave. El plan identifica y describe los medios para desarrollar y nutrir una comunidad de investigación SZ4D multidisciplinar que promoverá la equidad y la inclusión entre el personal dentro de los Estados Unidos y nuestros socios internacionales. También establece la infraestructura de investigación novedosa necesaria para lograr estos objetivos, así como una posible estructura del programa de SZ4D que atendería las necesidades de una comunidad de investigación diversa y vibrante durante décadas.

## PROCESO DE LA RED DE COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN

Los inicios del proceso de la RCN surgieron de una reunión a finales de 2016 en Boise, Idaho, donde más de 250 científicos de 22 países concibieron una iniciativa de SZ4D, que culminó en el informe, *The SZ4D Initiative: Understanding the Processes that Underlie Subduction Zone Hazards in 4D* (McGuire et al., 2017). En este documento, la comunidad científica articuló la necesidad de inversiones en infraestructura y un programa científico integral centrado específicamente en los peligros geológicos en las zonas de subducción. Posteriormente, en 2018, la Fundación Nacional de Ciencias (NSF) estableció dos Redes de Coordinación de Investigación, la RCN del marco de SZ4D y el Modelado colaborativo para la subducción de RCN, para permitir que la comunidad de investigación de los EE. UU. trabaje conjuntamente para desarrollar un plan de consenso para un programa de SZ4D.

La RCN de SZ4D (**Figura I-1; Apéndice I-1**) se encargó de traducir la visión amplia en el informe de McGuire et al. (2017) en un plan concreto y viable para un futuro programa SZ4D. El comité de Catalización de Oportunidades de Investigación en Ciencias de la Tierra (CORES) de las Academias Nacionales reconoció el desarrollo continuo y la financiación final de SZ4D como una actividad de alta prioridad para la División de Ciencias de la Tierra de la NSF en su informe *A Vision for NSF Earth Sciences 2020–2030: Earth in Time* (NASEM, 2020).

La RCN estableció por primera vez un comité Directivo y buscó el desarrollo de un programa de SZ4D obteniendo información de una amplia y representativa sección transversal de la comunidad de investigación de subducción de peligros geológicos. Los grupos de trabajo sobre los tres temas científicos principales se identificaron mediante consulta con la afiliación inicial a la RCN. Estos grupos han trabajado para desarrollar los planes detallados

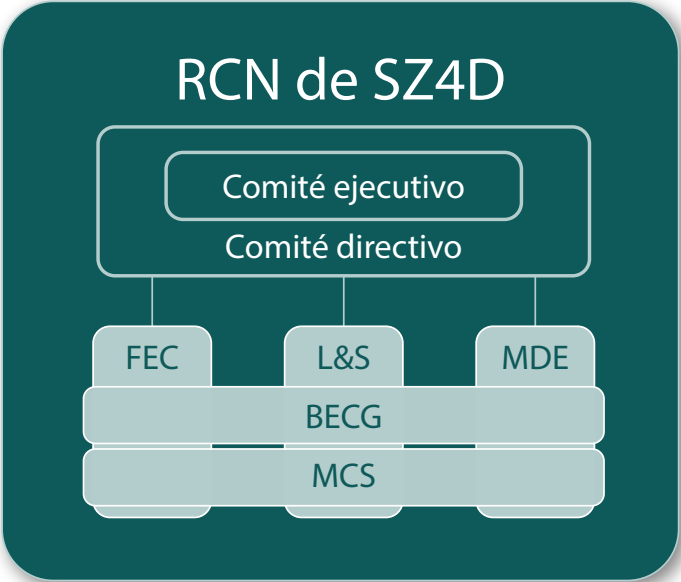
establecidos en los **capítulos 2, 3 y 4** de este plan de implementación. Simultáneamente, dos grupos integradores recopilaban información de la comunidad para reunir los planes de guía descritos en los **capítulos 5 y 6**, lo que representa nuestra visión colectiva para BECG a través de la comunidad de investigación de SZ4D y un programa para crear una capacidad de modelado de próxima generación y una comunidad para la investigación de la zona de subducción (MCS), respectivamente.

Los 74 miembros de los grupos de trabajo e integradores se reunieron continuamente durante 2020-2022 para crear este plan de implementación. Por el camino, la RCN involucró a más de 3400 participantes a través de talleres, seminarios web, reuniones generales y sesiones de grupos de interés especial vinculadas a conferencias y reuniones profesionales específicas, todo durante la desafiante era del teletrabajo durante la pandemia de 2020-2021. La RCN también organizó 13 seminarios web que aportaron información de expertos de 11 países. Los miembros de grupos de trabajo e integradores incluyeron diversas voces de la comunidad investigadora para equilibrar la necesidad de crear un plan específico y centrado, respetando al mismo tiempo las prioridades de consenso de los cientos de científicos que representan.

Los grupos de trabajo e integradores se centraron inicialmente en desarrollar preguntas de investigación y observaciones críticas a lo largo de 2020, cuando se solicitó la aportación de la comunidad a través de una serie de seminarios web. Basándose en este aporte de la comunidad, así como en el aporte de los otros grupos de trabajo, cada grupo perfeccionó aún más sus preguntas de investigación y requisitos de medición clave a lo largo de 2020 y 2021. Una vez establecido un marco, las preguntas se asignaron a matrices de trazabilidad que representaban cómo las metas científicas y los objetivos “se rastrean” (se reducen) a los requisitos de instrumentos y datos. A continuación, los grupos desarrollaron experimentos teóricos que capturaron actividades clave. En paralelo, la RCN desarrolló un inventario de zonas de subducción a nivel mundial para evaluar su idoneidad para los experimentos teóricos. Los grupos de trabajo e integradores combinaron sus requisitos y recomendaciones para áreas geográficas y desarrollaron un plan por fases de experimentos y actividades.

Como parte de este proceso, cada grupo de trabajo completó un borrador de documento que identificaba las preguntas clave de la investigación, las mediciones necesarias para abordarlas, los tipos de experimentos necesarios para probar hipótesis específicas derivadas de las

**Figura I-1.** Gráfico de organización de la Red de Coordinación de Investigación (RCN) de SZ4D. Grupos disciplinares: L&S: Relieves terrestres y relieves marinos, FEC: Ciclos de fallas y terremotos, y MDE: Desencadenantes magmáticos de erupciones; grupos integradores de SZ4D: BECG: Desarrollo de equidad y capacidad geocientífica y MCS: Modelado colaborativo para la subducción.



preguntas de la investigación y las ubicaciones geográficas en las que podrían llevarse a cabo estos experimentos. Cada grupo optó por enmarcar su trabajo en términos de preguntas de investigación, preguntas científicas o hipótesis. Estas variaciones reflejan la naturaleza orgánica del proceso del grupo de trabajo, que fusionó múltiples comunidades con tradiciones distintas en la descripción de sus objetivos científicos. Estos borradores de informes fueron revisados de forma cruzada por otros grupos de trabajo para identificar y destacar las preguntas científicas y los requisitos de medición que abarcan la comunidad científica de la zona de subducción más amplia. Este borrador completo del informe se publicó para los comentarios de la comunidad en octubre de 2021 para garantizar que los documentos articulan una opinión científica consensuada sobre las preguntas científicas más importantes y las redes de instrumentos y modelos que necesitaremos para abordarlas.

Durante el año siguiente, los comentarios de la comunidad subsiguientes se combinaron con aportaciones internacionales adicionales, lo que permitió una mayor especificidad de la planificación. Los debates geográficos se centraron en Chile como el centro internacional crítico, y se celebró un taller presencial en Los Andes, Chile, en mayo de 2022 (es decir, tan pronto como las exigencias de la pandemia global permitieron dicha reunión). Los conocimientos de los más de 60 científicos chilenos permitieron que una planificación más concreta progrese con los méritos relativos de los objetivos científicos y geográficos más claramente delimitados. Las colaboraciones internacionales aumentaron aún más con una reunión presencial realizada en junio de 2022 en Potsdam, Alemania, para incorporar el trabajo de los esfuerzos europeos a largo plazo en la región. Cascadia y Alaska se identificaron como centros nacionales para nuevas observaciones y estudios dirigidos que aprovechaban los datos existentes.

## DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PLAN CIENTÍFICO

El objetivo general de SZ4D es obtener información sobre los procesos físicos y químicos fundamentales que sustentan los peligros geológicos en las zonas de subducción. El **capítulo 2** describe los temas críticos intersectoriales relacionados con peligros geológicos que abarcan todos los grupos de trabajo. Uno de los temas clave emergentes es la previsión y predicción de peligros geológicos, lo cual es deseable pero actualmente solo alcanzable en diversos grados. La previsión es un campo maduro que anticipa de forma probabilística varios peligros o riesgos. El estudio de predicción estrechamente relacionado se centra en hipótesis científicas de comportamiento futuro. La predicción científica puede ser completamente determinista o probabilística dependiendo del grado de certeza del estado físico y la dinámica subyacente del sistema. El enfoque de SZ4D en el proceso se inclina más fuertemente hacia la evaluación de la previsibilidad basada en la física de los peligros geológicos relacionados con la subducción. Un elemento fundamental tanto para la previsión como para la predicción es la existencia o ausencia de comportamiento precursor y su identificación.

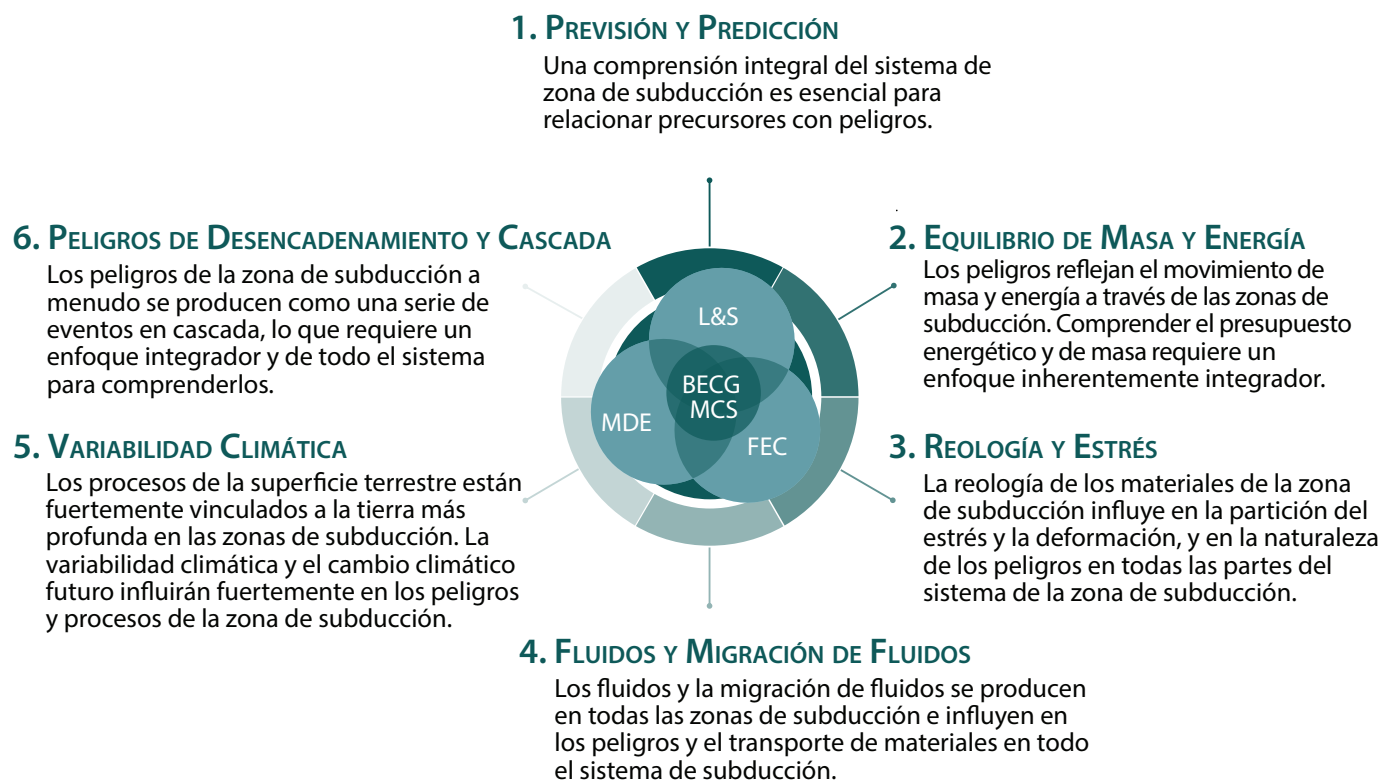
La previsibilidad ha seguido siendo desafiante o difícil de evitar para todos los peligros de la zona de subducción; ¿se debe esto simplemente a la falta de una medición adecuada de las variables de control, o es el proceso intrínsecamente estocástico o caótico? ¿Podríamos pronosticar todas las erupciones volcánicas mediante la implementación de instrumentos suficientes para detectar señales sutiles, o es necesario dilucidar las diferencias fundamentales en el proceso o el estado mecánico antes de lograr este objetivo? Los experimentos teóricos y de laboratorio sugieren que deben existir señales precursoras de terremotos y deslizamientos de tierra. ¿Es la predicción simplemente una cuestión de observaciones insuficientes o de estudiar procesos precursores clave que aún no se comprenden?

Además de la previsión y la predicción, los grupos de trabajo de SZ4D identificaron otros cinco temas intersectoriales (**Figura I-2**). Para comprender la ubicación, magnitud y posible destrucción de los peligros de la zona de subducción, es esencial desentrañar **el estrés, la masa y el equilibrio energético** dentro de los sistemas de subducción. La transferencia de masa acopla el sistema de subducción y los eventos peligrosos, e implica transformar la energía de una forma a otra. La conexión entre el estrés y la deformación es el dominio de la **reología**, que es esencial para todas las facetas del esfuerzo de SZ4D. Las observaciones de deformación generalmente miden la tensión, pero la comprensión predictiva de los procesos requiere conocimiento del estrés. **Los fluidos** proporcionan el modo de transporte más rápido

a través del sistema y ejercen un control de primer orden sobre los peligros geológicos tanto en el sistema profundo como en el poco profundo. La **variabilidad climática** cambia la tierra expuesta y los forzamientos, lo que a su vez afecta al peligro posterior. Los peligros geológicos también pueden interactuar directamente, y el esfuerzo combinado de SZ4D puede capturar estas **cascadas desencadenantes** que pueden dar lugar a escenarios catastróficos de múltiples peligros.

Estos temas intersectoriales y las preguntas del grupo de trabajo exigen importantes esfuerzos de observación y de recopilación de datos, que se dividen en dos categorías: redes instrumentales y actividades realizadas por un colectivo de científicos.

**Figura I-2.** Una visualización de seis temas científicos intersectoriales que vinculan los tres principales grupos disciplinares de SZ4D, Relieves Terrestres y Relieves Marinos (L&S), Ciclos de Fallas y Terremotos (FEC) y Desencadenantes magmáticos de erupciones (MDE); y dos grupos integradores de SZ4D, Desarrollo de equidad y capacidad geocientífica (BECG) y el Modelado colaborativo para la subducción (MCS). Cada tema científico incorpora preguntas y objetivos fundamentales que trascienden una única disciplina y se mejoran a través de un enfoque a escala de sistema.



En primer lugar, SZ4D requiere **instrumentación geodésica y sísmica anfibia** implementada en una red instrumental (**MegaArray**) que abarca un segmento completo de ~500 km de longitud y está densificada en áreas críticas, **redes instrumentales volcánicas (VolcArray)** de paquetes de instrumentación volcánica estandarizados y multiparamétricos, y **redes instrumentales de detección de cambios en la superficie y el medio ambiente (SurfArray)** que crean imágenes de los cambios en la superficie de la Tierra, el transporte de sedimentos y las lluvias. Estas redes instrumentales solo pueden interpretarse y utilizarse con esfuerzos complementarios para:

1. Extraer el registro geológico del contexto reológico, químico e histórico a través de estudios geológicos y experimentales;
2. Crear imágenes de la subsuperficie para determinar directamente las estructuras;
3. Crear un entorno de modelado que pueda integrar y guiar las observaciones junto con los datos obtenidos de los experimentos de laboratorio;
4. Desarrollar la capacidad humana para realizar la investigación, adoptando toda la diversidad de personas disponibles; y
5. Traducir los hallazgos científicos en conocimientos que proporcionen beneficios tangibles a las comunidades afectadas por los peligros de la zona de subducción.

Los puntos 1 y 2 se abordan en los planes de los grupos de trabajo (**capítulos 3.1 a 3.3**). El punto 3 es abordado por el grupo integrador de MCS (**Capítulo 4.2**), lo que resulta en una recomendación para una instalación dedicada a este problema. **Todas las partes de SZ4D requieren los puntos 1 a 3 y, por lo tanto, proporcionan otro enlace importante en todo el programa y un mecanismo para crear una imagen completa de la estructura y el comportamiento de la zona de subducción.**

Los puntos 4 y 5 requieren una atención y una estrategia especiales. Sin alcanzar estos objetivos centrados en el ser humano, el impacto de todo el esfuerzo de SZ4D es limitado. El grupo integrador de Desarrollo de equidad y capacidad geocientífica ha formulado un plan (**Capítulo 4.1**) que incluye actividades específicas que fomentarán el desarrollo de capacidades internacionales, la equidad de peligros, la justicia social, la educación y la formación, la difusión distribuida y la colaboración interdisciplinaria, y que aumentarán la diversidad, la equidad y la inclusión. Las necesidades clave se satisfarán mediante un esfuerzo coordinado que implique el compromiso con la comunidad, la investigación en ciencias sociales y educación, y la centralización de recursos. La comunidad de SZ4D participaría en una red cooperativa que buscase lograr impactos más amplios, sostenibles y a largo plazo aprovechando las organizaciones no gubernamentales y sin ánimo de lucro existentes que actualmente trabajan con comunidades en la huella de SZ4D.

En segundo lugar, la habilitación de SZ4D requerirá inversión en instalaciones, algunas de las cuales existen actualmente y otras que necesitan desarrollarse, combinarse o aumentarse. Como se describe en el **Capítulo 5.4**, es necesario el apoyo de la instalación en varias áreas clave.

1. **Instrumentación marina**, incluidas MegaArray y SurfArray. Esta nueva instalación proporcionará soporte dedicado para grupos de instrumentos sísmicos y geodésicos, recopilación de batimetría de alta resolución y otros datos de imágenes geofísicas, equipos de ingeniería operativa y buques marinos (tripulados y autónomos) para el despliegue, el servicio y la respuesta rápida cerca de los sitios de despliegue denso.
2. **Redes instrumentales en tierra**, incluidos componentes de VolcArray, SurfArray y MegaArray. Las instalaciones actuales pueden, en parte, aprovecharse para satisfacer las necesidades del grupo de instrumentación terrestre.

3. Logística para la recogida de muestras, instrumentación y programas de campo que implican **despliegues humanos** como instrumentos de observación principales para recopilar datos sistemáticos y estandarizados, incluida la paleosismología, mapeo de estructuras, muestras para geocronología, geoquímica y petrología. Imaginamos una instalación que incluya una estación de campo que pueda apoyar la logística de campo, las adquisiciones de imágenes y la autorización, el archivado y el transporte de muestras.
4. Un **modelado colaborativo**. Esta instalación desarrollaría nuevos modelos físicos de zona de subducción y herramientas computacionales que aprovechan los avances en aprendizaje automático para la ciencia basada en datos, así como proporcionar recursos para su uso por parte de toda la comunidad de investigación SZ4D, incluidos estudiantes, postdoctorandos e investigadores.
5. Un **Consortio de Laboratorio y Muestras**. Este consorcio permitiría el estudio de las propiedades de los materiales, la reología durante la deformación y el equilibrio de fases de los sistemas fundidos.

La escala y el alcance del programa integral propuesto requieren un enfoque por fases, tal como se describe en el **Capítulo 5.3**. La actividad de la fase 0 se completa en gran medida a través del trabajo de la comunidad de SZ4D para desarrollar este plan de implementación. La fase 1 está actualmente en marcha, con el desarrollo continuo de diseños de experimentos detallados y protocolos analíticos, tecnología y soporte de

instalaciones y centros de datos para satisfacer necesidades científicas posteriores. También se están realizando actividades de modelado y esfuerzos de campo de nivel de reconocimiento piloto. La fase 2 abarcará el despliegue completo a escala decadal de campañas de campo para observar y analizar los sistemas de subducción de forma integral. Las redes instrumentales se guiarán y, a su vez, guiarán el desarrollo de modelos y la investigación de laboratorio. Por último, la Fase 3 implica la digestión y síntesis de toda la actividad multifacética de SZ4D, consolidando la información en estos complejos sistemas terrestres.

Los peligros geológicos de la zona de subducción están afectando a más personas a medida que aumenta la densidad de población a lo largo de las costas y se expande la infraestructura. La vulnerabilidad es alta y es claramente deseable tener un mejor conocimiento de la predicción de peligros. Los enfoques actuales para la predicción de erupciones y deslizamientos de tierra son empíricos; la predicción de terremotos sigue estando fuera de nuestro alcance. Un amplio conjunto de procesos es responsable de cada uno de estos peligros, pero capturar las señales que conducen a eventos peligrosos con suficiente fidelidad y contexto geológico para la comprensión ha sido difícil de entender. Al proporcionar datos densos, continuos y estandarizados que puedan integrarse fácilmente en un marco interpretativo, SZ4D proporcionará la comprensión fundamental necesaria para evaluar mejor los riesgos de terremotos, volcánicos, deslizamientos de tierra y peligros de tsunami para las comunidades en las regiones de zonas de subducción.

## REFERENCIAS

- McGuire, J.J., T. Plank, et al. 2017. *The SZ4D Initiative: Understanding the Processes that Underlie Subduction Zone Hazards in 4D*. Vision Document Submitted to the National Science Foundation. The IRIS Consortium, 63 pp. [https://www.sz4d.org/\\_files/ugd/66466d\\_c5202b9573e1413eb006995304a4b274.pdf](https://www.sz4d.org/_files/ugd/66466d_c5202b9573e1413eb006995304a4b274.pdf)
- NASEM (National Academies of Sciences, Engineering, Medicine). (2020). *Earth in Time: A vision for NSF Earth Sciences 2020–2030*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25761>

# TEMAS CIENTÍFICOS INTERSECTORIALES



UNA VISIÓN INTEGRADA DE LOS  
PELIGROS DE LA ZONA DE SUBDUCCIÓN

## INTRODUCCIÓN

Los peligros de las zonas de subducción, como terremotos, erupciones volcánicas, deslizamientos de tierra y tsunamis, tienen impactos grandes, costosos y de larga duración en las sociedades humanas. Los ejemplos modernos incluyen grandes terremotos y tsunamis en Alaska (1964), Sumatra (2004) y Japón (2011); el deslizamiento de tierra de Oso en el estado de Washington en 2014 y la erupción del Monte Santa Elena en 1980. Todos estos acontecimientos provocaron una pérdida significativa de la vida y alteraciones duraderas a escala local, regional y, en algunos casos, global. Aunque el impacto en las sociedades de los principales eventos de peligro en la zona de subducción es muy alto, la ciencia subyacente necesaria para comprender estos fenómenos tan dañinos sigue estando lejos de resolverse.

**El objetivo general de la iniciativa de SZ4D es desarrollar una comprensión integrada de cómo interactúan los diferentes componentes de los sistemas de zonas de subducción para producir y magnificar los peligros geológicos.**

La clave para esta comprensión es desentrañar las funciones que desempeñan los procesos físicos y químicos de la zona de subducción en el inicio y luego enlazar diferentes peligros en el espacio y el tiempo. Del mismo modo que las personas que viven en zonas de subducción no se preocupan por “solo” terremotos, “solo” tsunamis, “solo” erupciones volcánicas o “solo” deslizamientos de tierra, SZ4D no se centra en “solo” peligros individuales. Los procesos en el trabajo en zonas de subducción a menudo producen una cascada en la que un evento peligroso inicial puede desencadenar eventos peligrosos adicionales que prolongan y magnifican el impacto de los peligros geológicos vinculados.

La naturaleza intersectorial integradora y disciplinar del enfoque SZ4D es deliberada y evidente en todos los niveles de la iniciativa.

Algunos ejemplos son:

- Nuestro enfoque fundamental de la localización de la ciencia y los recursos humanos para proporcionar eficiencia e integración en todas nuestras actividades.
- Nuestro enfoque geográfico, diseñado para permitir la integración y comparación de procesos de zonas de subducción en múltiples zonas de subducción.
- Nuestra estructura organizativa, donde cada grupo de trabajo está formado por personas que tienen una serie de especialidades disciplinares y que colaboran en torno a objetivos científicos y comunitarios comunes. Además, los grupos integradores, como MCS y BECG, abordan las necesidades identificadas que se extienden a todos los objetivos científicos y de inclusión.
- Nuestro fomento de una serie de otros esfuerzos integradores, incluido el diseño e implementación de redes instrumentales que respalden múltiples objetivos de grupos de trabajo, el diseño de una instalación de despliegue humano para abordar las necesidades de trabajo de campo en todos los grupos de trabajo y la organización continua de grupos en torno a otras necesidades, como métodos experimentales y analíticos, que también respalden múltiples objetivos científicos.

## TEMAS CIENTÍFICOS INTERSECTORIALES DE SZ4D

La naturaleza integrativa y sinérgica de la ciencia que motiva a SZ4D es evidente en el número de temas de investigación que cruzan los grupos de trabajo individuales (**Figura CST-1**). Este capítulo explora varios de estos temas con mayor detalle y destaca las áreas en las que nuestras investigaciones y resultados proporcionan las

mejores oportunidades para realizar avances fundamentales en todos los grupos de trabajo de SZ4D.

### Previsión y predicción

**¿Cómo reconocemos las señales de precursores a los devastadores eventos de peligro de subducción, qué técnicas necesitamos usar para monitorearlos y cómo relacionamos dichos precursores con la magnitud eventual y el estilo del evento de peligro?**

Las zonas de subducción generan algunos de los peligros geológicos más devastadores de la Tierra, incluidos terremotos, deslizamientos de tierra, erupciones volcánicas y tsunamis. Proporcionar previsiones y advertencias sólidas a poblaciones vulnerables es importante para mitigar los posibles impactos de estos desastres. El concepto de previsión es simple en principio, pero extremadamente difícil de ejecutar: las previsiones sólidas se basan en una comprensión exhaustiva de todo el sistema, sus incertidumbres y cómo responde a los cambios. En este marco, las fuerzas desencadenantes y las señales precursoras que conducen a eventos peligrosos (p. ej., terremotos, sismos precursores, desequilibrio volcánico y arrastre de pendiente) proporcionan cierta información sobre los niveles de peligro relativos, lo que permite una supervisión detallada para proporcionar una evaluación continua del potencial de peligro.

Aunque los niveles de peligro relativos pueden medirse toscamente, estos indicadores de actividad, a menudo incoherentes y poco fiables, no pueden traducirse fácilmente en predicciones seguras sobre cuándo y dónde se producen peligros de subducción. Esto refleja las brechas en nuestra comprensión del sistema de subducción, la naturaleza de las señales precursoras y la forma en que el sistema responde a los forzamientos. Como resultado, las señales de advertencia de un peligro inminente en la zona de subducción a menudo son difíciles de determinar, y pueden producirse catástrofes con poca o ninguna advertencia. Por lo tanto, un enfoque de la iniciativa SZ4D es estudiar las posibles señales precursoras y conectarlas

con los posibles peligros a través de una sólida comprensión de los procesos físicos y químicos activos en las zonas de subducción y los materiales líquidos, sólidos y gaseosos que fluyen hacia dentro y hacia fuera de ellos.

Aunque los grupos de trabajo disciplinares de SZ4D coinciden en que la capacidad de identificar señales precursoras es fundamental para la previsión de los peligros de la zona de subducción, la mayoría también está de acuerdo en que los datos recopilados sobre eventos precursoros no proporcionan actualmente la información necesaria para predecir la magnitud, duración y área de impacto de un peligro eventual. Algunos ejemplos importantes incluyen las relaciones entre:

1. Sismos precursores y terremotos,
2. Deformación y precursores sísmicos,
3. Mecanismos y estilos de erupciones volcánicas,
4. Rápido transporte de sedimentos y predicción de inundaciones.

Los grandes deslizamientos de tierra también tienen señales precursoras similares a algunas erupciones volcánicas y terremotos. Sin embargo, los controles fundamentales sobre el inicio y el descentramiento de los deslizamientos de tierra, las corrientes de turbidez y otros eventos de flujo másico siguen siendo menos claros.

**Figura CST-1.** Una visualización de seis temas científicos intersectoriales que unen los tres grupos disciplinares principales de SZ4D, Relieves Terrestres y Relieves Marinos (L&S), Ciclos de Fallas y Terremotos (FEC) y desencadenantes magmáticos de la erupción (MDE); y dos grupos integradores de SZ4D, desarrollo de equidad y capacidad geocientífica (BECG) y el modelado colaborativo para la subducción (MCS). Cada tema científico incorpora preguntas y objetivos fundamentales que trascienden una única disciplina y se mejoran a través de un enfoque a escala de sistema.



Para obtener una comprensión integrada de los procesos y materiales necesarios para relacionar las señales precursoras con los peligros, también debemos abordar los estudios de zonas de subducción de formas novedosas y superar los límites disciplinares tradicionales en nuestra investigación. Se hará un importante énfasis en la fusión modelo-datos. Esta técnica es extremadamente útil para las investigaciones de predicción y previsión de peligros y también es importante para muchos otros estudios de SZ4D. La fusión de modelo-datos requiere la integración de información de múltiples fuentes de datos en los dominios de modelado y observación para producir resultados más coherentes, precisos y útiles que los proporcionados por cualquier fuente de datos individual.

El grupo integrador de MCS está preparado para cubrir esta brecha computacional en las geociencias y proporcionar marcos basados en la física y los datos para combinar los conjuntos de datos de laboratorio y de observación multiescala, multiparámetros y multidisciplinarios recopilados por SZ4D. El MCS permitirá a los científicos de SZ4D aplicar técnicas de inversión de datos a múltiples flujos de datos para revelar las relaciones entre posibles precursores y peligros en muchos plazos diferentes. El progreso en la fusión modelo-datos es específicamente necesario para la previsión, que utiliza volúmenes muy grandes de datos diversos de fuentes centralizadas y distribuidas (p. ej., registros de terremotos, observaciones satelitales, mediciones GNSS). Durante las últimas décadas, se han realizado avances significativos en la asimilación de datos estadísticos en los campos del modelado climático, la hidrología y la oceanografía física, y estos proporcionan apoyos importantes para futuros esfuerzos de MCS en los peligros de la zona de subducción, donde sigue habiendo un trabajo significativo para avanzar en este campo. Otro objetivo del MCS es facilitar a los científicos de SZ4D el uso de metodologías de la fusión de modelo-datos en su investigación. El MCS mejorará y respaldará la interoperabilidad de los datos y el software y permitirá la integración y colaboración en diferentes dominios científicos de subducción.

## Equilibrio de masa y energía

**¿Cómo realizamos un seguimiento del paso de masa y energía a través de zonas de subducción, y cómo relacionamos transiciones críticas en la transferencia de masa y energía con eventos peligrosos?**

Nuestra comprensión de la ubicación, magnitud y posible destrucción de los peligros de la zona de subducción depende de nuestro conocimiento de la distribución y equilibrio de masa y energía dentro de los sistemas de subducción. Se producen cambios importantes en la distribución de masa y energía dentro y a través de la superficie de la Tierra en las zonas de subducción en respuesta a los movimientos tectónicos de la placa y los procesos atmosféricos. Eventos peligrosos como terremotos, tsunamis, deslizamientos de tierra y erupciones volcánicas son respuestas y manifestaciones de esta redistribución. Como resultado, el registro de los cambios en la distribución de masa y energía antes, durante y después de eventos peligrosos en múltiples zonas de subducción proporcionará la información necesaria para avanzar significativamente en la comprensión de los factores que controlan los peligros.

Un ejemplo de cómo el conocimiento de la distribución de masas y energía reduce las disciplinas tradicionales es el estudio de la relación entre el transporte de sedimentos y el comportamiento de subducción. El transporte de sedimentos en la fosa puede afectar los procesos de deslizamiento y las tasas a lo largo del Megathrust, y el aumento asociado con la actividad sísmica influye fuertemente en el transporte de sedimentos. La reducción de sedimentos también contribuye a especies volátiles que influyen en el comportamiento del Megathrust a niveles poco profundos en la zona de subducción e impactan en tasas de producción de magmas más profundas, que finalmente contribuyen a la actividad volcánica y los peligros. Los intercambios de masa y energía dentro de una zona de subducción también influyen en la tectónica de la corteza, las tasas de elevación y la evolución de la topografía, donde la energía potencial gravitacional se convierte

en energía cinética a través del transporte de sedimentos, incluidos los eventos destructivos como los deslizamientos de tierra y los flujos de detritos.

La acumulación de energía dentro del sistema de subducción genera eventos peligrosos y controla la escala del evento. Por lo tanto, aunque el conocimiento del estado de estrés podría indicarnos cuán cerca está un sistema de fallas, se necesita información adicional sobre el equilibrio de masa y energía para predecir el tamaño de esa falla.

Calcular el balance de energía y masa de una zona de subducción con suficiente detalle y precisión requiere conocimiento del flujo de calor, la tensión y el estrés asociados con el volcanismo, los terremotos y la deformación, y sus cambios en la superficie de la Tierra (**Figura CST-2**). Estas mediciones se integrarán en modelos numéricos del sistema de subducción a un rango de presiones, temperaturas y tasas de deformación para proporcionar una imagen 4D más precisa de los posibles peligros de la zona de subducción.

### Reología y estrés

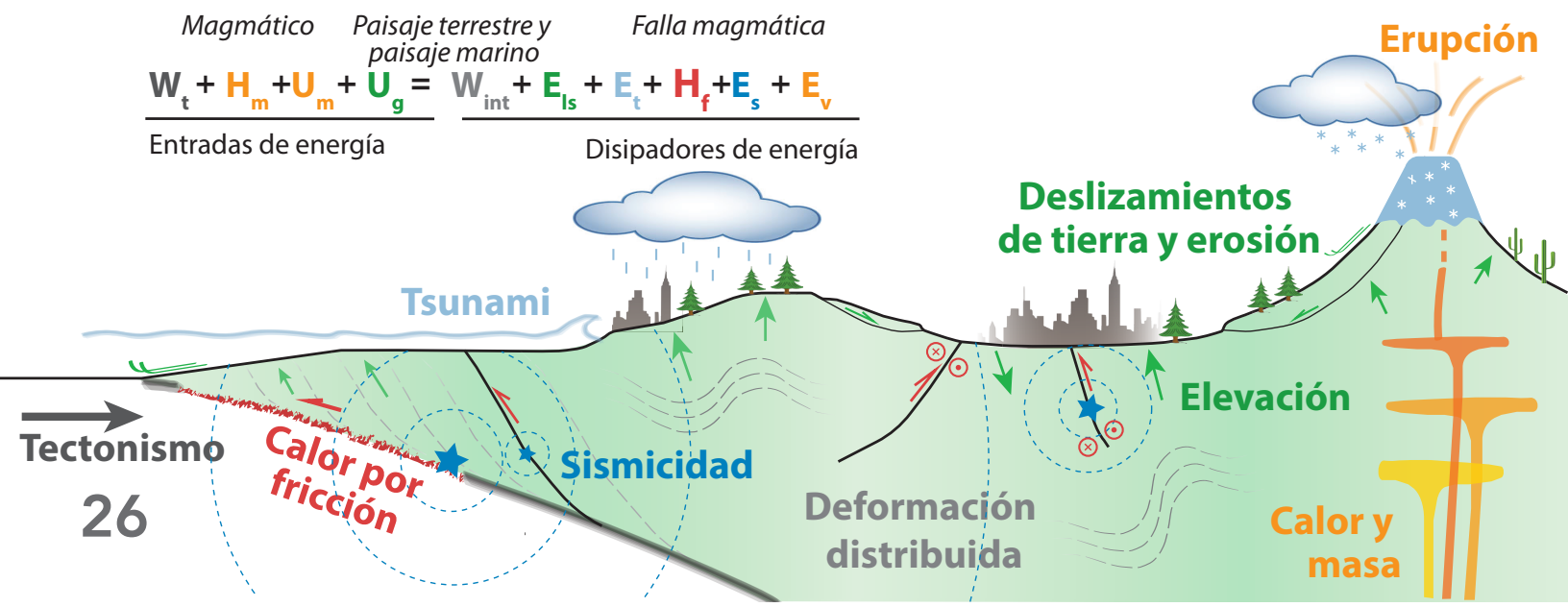
**¿Cómo influye la reología de los materiales de la zona de subducción en la partición del estrés y la deformación, y cómo controla esto la naturaleza de los peligros en todo el sistema de la zona de subducción?**

Cuando se inician los peligros de la zona de subducción, la energía potencial se convierte en deformación en la Tierra sólida y fluida de acuerdo con la reología de los materiales de la Tierra involucrados en la liberación de energía. Además, la reología controla la forma en que se liberan cargas geodinámicas continuas en el tiempo y el espacio. Por lo tanto, comprender la reología de los materiales de la zona de subducción mejorará la previsión de futuros terremotos y erupciones volcánicas, y el inicio y el agotamiento de los movimientos de masa como los deslizamientos de tierra y los flujos de detritos.

El conocimiento de la reología de los materiales de la Tierra implicados en cada uno de los principales peligros de la zona de subducción es limitado, por lo que las actividades centradas

**Figura CST-2.** Balance energético esquemático de primer orden de toda la zona de subducción. La ecuación de inserción describe en las entradas energéticas ( $W_t$  - trabajo tectónico;  $H_m$  - calor;  $U_m$  - energía potencial gravitacional de entrada/salida de masa del sistema), términos de energía conservadores ( $U_g$  - trabajo de elevación contra la gravedad;  $W_{int}$  - trabajo de deformación interna) y disipadores de energía que se pierden en el sistema ( $E_{ls}$  - energía cinética del transporte de sedimentos;  $E_t$  - energía tsunami;  $H_f$  - calor friccional de terremotos;  $E_s$  - temblor sísmico y  $E_v$  - calor y energía cinética de erupciones volcánicas). Comprender las relaciones entre los procesos de la zona de subducción proporciona información sobre la energía disponible dentro del sistema para impulsar peligros dañinos.

$$\begin{array}{c} \text{Magmático} \quad \text{Paisaje terrestre y} \quad \text{Falla magmática} \\ \text{paisaje marino} \\ W_t + H_m + U_m + U_g = W_{int} + E_{ls} + E_t + H_f + E_s + E_v \\ \hline \text{Entradas de energía} \quad \quad \quad \text{Disipadores de energía} \end{array}$$



en la reología tienen una amplia aplicación. Por ejemplo, los flujos granulares son mezclas de componentes sólidos y fluidos y pueden exhibir reología e hidrodinámica altamente complejas y variables donde las leyes constitutivas aún están en debate. Predecir el comportamiento de los sedimentos transmitidos por el agua, las interfaces de falla, los flujos de lava y piroclásticos y los depósitos de flujo de masa producidos por los deslizamientos de tierra requieren comprender el flujo granular y, por lo tanto, se necesitan esfuerzos coordinados experimentales, de observación y de modelado aquí. Del mismo modo, los cambios en la reología que se producen durante la tensión y deformación continuas pueden producir un debilitamiento dinámico de las rocas de la corteza inferior y del manto que afectan a nuestra comprensión de los sistemas volcánicos, la carga de fallas y el soporte de la topografía.

Las actividades dentro de SZ4D mejorarán nuestro conocimiento de la reología de los materiales críticos de la Tierra. Los experimentos de laboratorio de vanguardia proporcionarán mediciones directas de la reología de los materiales de la zona de fallas, las rocas de la corteza y las mezclas de flujos granulares que mapean cómo las tensiones se convierten en deformaciones en estos materiales a las deformaciones, tasas de deformaciones, presiones y temperaturas relevantes. Los datos geológicos pueden revelar evidencias de procesos a pequeña escala como solución de presión, microcraqueo, plasticidad del cristal y metamorfismo. Las mediciones geofísicas de las redes instrumentales de observación medirán los movimientos de los materiales de la zona de subducción a la escala del sistema de la zona de subducción en respuesta a las tensiones modeladas y observadas, y por lo tanto proporcionarán información sobre la reología in situ. Estas descripciones reológicas se combinarán con modelos geodinámicos para comprender cómo interactúa la carga con la reología de los materiales de la zona de subducción para producir los movimientos que observamos. La reología, estudiada en el laboratorio e inferida a la escala del sistema

de zona de subducción, es fundamental para comprender la dinámica que produce los peligros de la zona de subducción.

## Fluidos y migración de fluidos

### ¿Cómo influye la migración de fluidos en los peligros y el transporte de materiales en todo el sistema de subducción?

Una mayor comprensión de la distribución de fluidos, la naturaleza y las consecuencias de la migración de fluidos y los impactos físicos y químicos de la interacción de fluidos sólidos es integral en todas las partes de la iniciativa SZ4D. El trabajo existente, incluidos los estudios realizados por iniciativas anteriores de NSF como MARGINS y GeoPRISMS, han proporcionado una visión significativa de la distribución de fluidos en zonas de subducción. La brecha que permanece yace en nuestro conocimiento de cómo los fluidos y la migración de fluidos intervienen en los intercambios de energía y masa en las zonas de subducción, y cómo la interacción de estos procesos produce peligros naturales.

La subducción implica la entrada de una placa oceánica altamente hidratada en el manto de la Tierra. Los fluidos cíclicos que entran en el manto y luego regresan a la corteza impulsan una miríada de procesos de zonas de subducción. El transporte de fluidos en las profundidades de la Tierra promueve la fusión y la formación de magmas, y controla la sismicidad en los Megathrust y otras fallas relacionadas, incluidas aquellas que producen los terremotos más destructivos. Además, el flujo de fluido a través de la corteza oceánica subducida y a lo largo del canal de subducción controla fuertemente muchas de las propiedades físicas y químicas de la litosfera subductiva, y como resultado modula gran parte de los complejos intercambios mineralógicos y químicos en esta región.

Los fluidos y la migración de fluidos también modulan los procesos dentro de la corteza superficial y en la superficie de la Tierra. La presión local del fluido influye en gran medida en los sistemas de fallas superficiales, y los cambios relacionados con la migración de fluidos pueden

afectar significativamente a la actividad sísmica. La interacción entre los fluidos poco profundos de la corteza y los magmas también puede producir erupciones freáticas y freatomagmáticas, como las erupciones letales recientes en Mount Ontake, Japón, en 2014; y Whakaari/White Island, Nueva Zelanda, en 2019 (**Figura CST-3**). La alteración de las estructuras volcánicas a través de una circulación hidrotermal poco profunda puede provocar fallas en las estructuras y eventos de remoción en masa. La circulación hidrotermal de fluidos conduce a la formación de importantes depósitos minerales, incluidos muchos metales necesarios para tecnologías “inteligentes” y para componentes de energía geotérmica con bajo contenido de carbono.

### Variabilidad climática

**¿Cómo influirá la variabilidad climática, y el cambio climático futuro, en los peligros y procesos futuros de la zona de subducción?**

Las zonas de subducción son los entornos tectónicos primarios de la placa donde la Tierra profunda se conecta directamente a los materiales y procesos de la superficie de la Tierra e influye en ellos, y viceversa. Las interacciones entre la atmósfera, la hidrósfera y la litosfera alteran las propiedades de los materiales de la zona de subducción e influyen en la carga superficial y el transporte de masa. El clima regional y la variabilidad climática influyen enormemente en estos procesos de superficie. Por lo tanto, el cambio climático futuro puede tener importantes ramificaciones para los tipos, la frecuencia y la magnitud de las grandes tormentas de la zona de subducción, los ríos atmosféricos y la remoción en masa y las inundaciones que desencadenan.

La variabilidad climática y el cambio modulan los peligros de la zona de subducción en escalas de tiempo largas ( $\geq 10^6$  años), intermedias ( $10^6$ - $10^4$  años) y cortas ( $\leq 10^4$  años). El clima regional a largo plazo afecta a la disponibilidad de agua, la fase (p. ej., lluvia frente a nieve) y la cantidad de precipitaciones, topografía y la intensidad y las tasas de meteorización. En escalas de tiempo intermedias, las oscilaciones climáticas afectan

a la hidrología terrestre, el nivel del mar y la vegetación, lo que puede alterar la generación, el flujo y el enrutamiento de sedimentos en zonas de subducción (**Figura CST-4**). En plazos más cortos, la variabilidad climática afecta al ciclo hidrológico, los eventos meteorológicos extremos, el transporte de sedimentos estocásticos y la cobertura de la vegetación.

En plazos largos e intermedios, la variabilidad climática afecta a los sistemas de transporte de erosión y sedimentos. Las variaciones en la carga de la superficie del avance y retroceso glacial, el cambio del nivel del mar y la erosión de la superficie también afectan al estado de estrés en profundidad. Los cambios en los volúmenes de hielo aumentan y disminuyen las cargas en los volcanes subaéreos, y los niveles del mar en aumento y en descenso hacen lo mismo con los sistemas volcánicos submarinos y de islas, lo que puede afectar la frecuencia y el estilo del desequilibrio volcánico. Del mismo modo, la actividad sísmica puede modularse mediante variaciones impulsadas por el clima en los volúmenes de hielo y agua. Las oscilaciones climáticas también modulan el suministro de sedimentos y el vertido de agua, acoplando estrechamente las tasas de erosión y transporte de sedimentos al clima, e influyendo en el sistema de transporte de sedimentos tierra-mar. Las variaciones en la erosión de la superficie que se modifican por el clima podrían afectar al estado de estrés en las fallas de la placa superior y los sistemas volcánicos de formas que aún no se han comprendido completamente.

El calentamiento climático desde el final del último máximo glacial ( $\leq 10^4$  años) ha intensificado algunos peligros geológicos de la zona de subducción. El retiro de los glaciares alpinos ha dado lugar a tasas elevadas de remoción en masa, inundaciones más frecuentes de estallidos de lagos glaciares y derretimiento de glaciares en estructuras volcánicas que pueden aumentar la frecuencia de erupción e impactar en peligros volcánicos asociados, como flujos de detritos o jökulhlaups (inundaciones de estallidos de glaciares). Como se observó en 2022 en Pakistán, los eventos de derretimiento glacial inducidos por el clima y las lluvias pueden



**Figura CST-3.** Ejemplos de procesos importantes de fluidos y eventos de migración de fluidos. A: La mortal erupción freática de Whakaari, Nueva Zelanda en 2019 (Lillani Hopkins/AP); B: Depósitos de Lahar en el río Toutle, Monte Santa Helena, 1980 (USGS); C: Manantiales fríos que alimentan el río Metolius, OR (Travel Oregon); D: Volcanes de arena asociados con el terremoto de Christchurch, Nueva Zelanda, 2011 (Wikimedia Commons); E: Mezcla de arcilla foliada del terreno franciscano (Wikimedia Commons); F: Una escuela destruida por el volcán de lodo Sidoarjo ("Lusi"), Indonesia (Wikimedia Commons).

influir catastróficamente en las inundaciones y la frecuencia de remoción en masa. El aumento de los niveles del mar también tiene implicaciones importantes para los peligros de tsunami. Los cambios en los patrones meteorológicos también afectan a la frecuencia y magnitud de grandes tormentas e incendios forestales, lo que también aumenta los peligros de pérdida de masa e inundaciones.

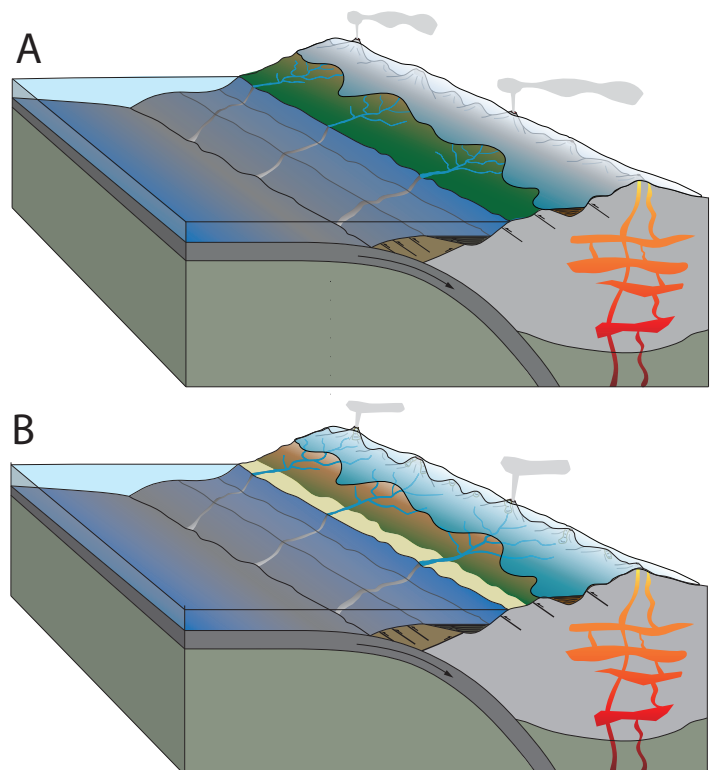
Las diferencias en los regímenes climáticos entre las zonas geográficas en contraste proporcionan a SZ4D una oportunidad sin igual de realizar experimentos naturales para evaluar los efectos de la variabilidad climática a largo y medio plazo y el cambio en los procesos y peligros de la zona de subducción. Al caracterizar y cuantificar las diferencias en la erosión, la meteorización, el transporte de sedimentos y la actividad sísmica y volcánica entre diferentes áreas, SZ4D podrá descubrir cómo responden los sistemas de subducción a las perturbaciones provocadas por el cambio climático y los impactos que estos cambios tienen en los peligros de la zona de subducción, especialmente a corto plazo, lo que es más preocupante para las poblaciones humanas.

## Peligros desencadenantes y en cascada

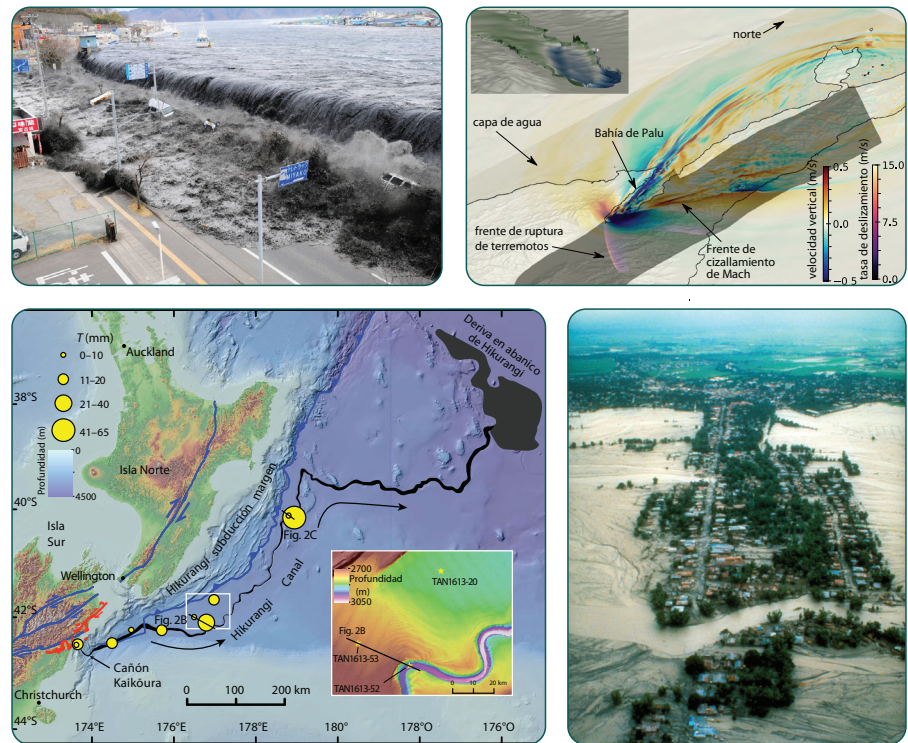
## ¿Cómo afectan las secuencias en cascada de eventos a los peligros de la zona de subducción?

Un ejemplo de la importancia de adoptar un enfoque integrado para comprender los procesos de la zona de subducción es el papel que desempeñan los procesos de desencadenamiento y cascada en los peligros de la zona de subducción. Los peligros en cascada se refieren a cómo los eventos individuales, como terremotos individuales o erupciones volcánicas, pueden desencadenar otros eventos que pueden ser como, o más, peligrosos que la secuencia original. Abundan los ejemplos de este proceso. Los terremotos, los flancos volcánicos colapsan y el desplome de masa sumergida desencadenan tsunamis. La actividad de deslizamientos de tierra puede aumentar debido a la gruesa cobertura de piroclastos de laderas después de erupciones volcánicas. Los terremotos pueden desencadenar erupciones volcánicas, así como deslizamientos de fallas en otras partes de un sistema. Las erupciones y los terremotos pueden iniciar eventos de transporte de masa tanto en tierra como en el mar.

**Figura CST-4.** Esquema de un segmento de zona de subducción durante un período glacial (A) y un período interglacial (B). La extensión del hielo es mayor y el nivel del mar es menor durante el período glacial. Los cambios en el volumen de hielo y el nivel del mar afectarán al estado de estrés en la corteza superior y media, lo que puede modular la frecuencia de las erupciones volcánicas y la actividad de fallas de la placa superior. La exposición de la plataforma costera durante los períodos glaciales en los bajos niveles del mar cambiará la dinámica y conectividad del sistema de transporte de sedimentos tierra-mar. Además, estas variaciones climáticas afectarán a la vegetación, la disponibilidad de agua y la meteorización, y por lo tanto modularán el suministro de sedimentos y el vertido de agua, lo que dará lugar a un transporte inestable de sedimentos a lo largo del tiempo.



**Figura CST-5.** Ejemplos de peligros de la zona de desencadenamiento y subducción en cascada. De izquierda a derecha: El tsunami de Tōhoku-Oki de 2011 (Reuters) causó más muertes que el terremoto de Mw9.0–Mw9.1. Modelo de computación de alto rendimiento (HPC) de la multifísica de la ruptura de terremotos y la interacción sísmica, acústica y de ondas de tsunami durante el terremoto y tsunami de Palu, Sulawesi, Indonesia de 2018 (Krenz et al., 2021). Corriente de turbidez de más de 680 km desencadenada por el terremoto multifalla de Kaikoura, Nueva Zelanda, de 2016 (Mountjoy et al., 2018). Lahar del Monte Pinatubo en 1991 (Reuters).



Los riesgos para las poblaciones humanas de eventos desencadenados como tsunamis, deslizamientos de tierra y lahares pueden ser mayores que los de causas primarias como temblores sísmicos y erupciones que los iniciaron (**Figura CST-5**). Por lo tanto, mitigar el riesgo de peligros requiere tener en cuenta la dinámica compleja del sistema de subducción en múltiples escalas espaciales y temporales. Dicha contabilidad solo puede lograrse con un enfoque integrador de todo el sistema para estudiar los peligros de la zona de subducción, como el propuesto por SZ4D.

Aunque por lo general se acepta la naturaleza en cascada de los peligros de la zona de subducción, los mecanismos subyacentes a menudo están poco restringidos. Los

mecanismos desencadenantes pueden variar desde efectos directos, como movimientos sísmicos, hasta impactos más indirectos, como el rápido retroceso que se produce cuando un tsunami generado por terremotos se aproxima por primera vez a una costa. Estos eventos en cascada e interactivos son un tema que solo está surgiendo en la actualidad en las evaluaciones de peligros operativos, y presentan un desafío para los enfoques empíricos, disciplinares y basados en datos existentes. Sin embargo, también son una oportunidad para fusionar disciplinas científicas de subducción y observaciones hacia la interoperabilidad, e identificar oportunidades para elevar los niveles de alerta de peligro de forma temprana.

## REFERENCIAS

- Krenz, L., Uphoff, C., Ulrich, T., Gabriel, A.-A., Abrahams, L. S., & Dunham, E. M. (2021). 3D acoustic-elastic coupling with gravity: The dynamics of the 2018 Palu, Sulawesi earthquake and tsunami. In *SC '21: Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*, 63, 1–14. <https://doi.org/10.1145/3458817.3476173>
- Mountjoy, J. J., Howarth, J. D., Orpin, A. R., Barnes, P. M., Bowden, D. A., Rowden, A. A., Schimel, A. C. G., et al. (2018). Earthquakes drive large-scale submarine canyon development and sediment supply to deep-ocean basins. *Science Advances* 4, 3. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aar3748>

# CICLOS DE FALLAS Y TERREMOTOS

¿CUÁNDO Y DÓNDE SE PRODUCEN TERREMOTOS GRANDES?



## MOTIVACIÓN CIENTÍFICA

¿Cuándo y dónde se producen terremotos grandes y dañinos? Ha habido un progreso notable en esta pregunta central en la ciencia de los terremotos en el siglo XXI. Ahora observamos directamente que las fallas se quiebran esporádicamente a una variedad de velocidades y escalas de tiempo, con un deslizamiento lento y rápido que interactúa para producir patrones de movimiento temporales y espaciales complejos. El excepcional número de grandes terremotos en la zona de subducción en los últimos 15 años ha permitido la evaluación de su relación con el entorno tectónico y la actividad anterior. En las zonas de subducción, las redes de fallas se adaptan a la deformación, incluidos los Megathrust y las fallas en las placas ascendentes y subducente, y todos estos sistemas de fallas contribuyen a los peligros de terremotos y tsunamis. Se están acumulando indicios de que existen relaciones sistemáticas entre la arquitectura de la zona de subducción

y el historial de deformación, las propiedades de fallas y la tendencia a grandes terremotos. Además, las nuevas y tentadoras observaciones de las posibles relaciones entre los diferentes tipos de comportamiento de deslizamiento de fallas abren nuevas vías de exploración que nos permitirán avanzar significativamente en la comprensión de los controles sobre los modos de deformación y los peligros de terremotos. Muchas de estas observaciones provienen de zonas de subducción, donde se producen los terremotos más grandes del mundo. El esfuerzo de los ciclos de fallas y terremotos (FEC) de SZ4D se centra en cuatro preguntas centrales, detalladas a continuación, que definen los límites de lo que sabemos sobre cuándo, dónde y por qué se producen grandes terremotos.

Existen solapamientos significativos entre FEC y otros componentes de la iniciativa de SZ4D. Los peligros de la zona de subducción, incluidos los terremotos, están vinculados a través de sus dependencias compartidas de la arquitectura, las propiedades del material,

la migración de fluidos y el estado de estrés. Estas propiedades están formadas por procesos tectónicos, magmáticos y sedimentarios a escala de sistemas que operan durante millones de años. Las fallas y terremotos dan forma a la geomorfología, modulan el estado de estrés y desencadenan eventos de remoción en masa, erupciones volcánicas, tsunamis y terremotos en otras partes del sistema. Como resultado, una comprensión fundamental de la ciencia que impulsa los peligros de la subducción requiere esfuerzos de observación, de modelado y experimentales ambiciosos e integrados para

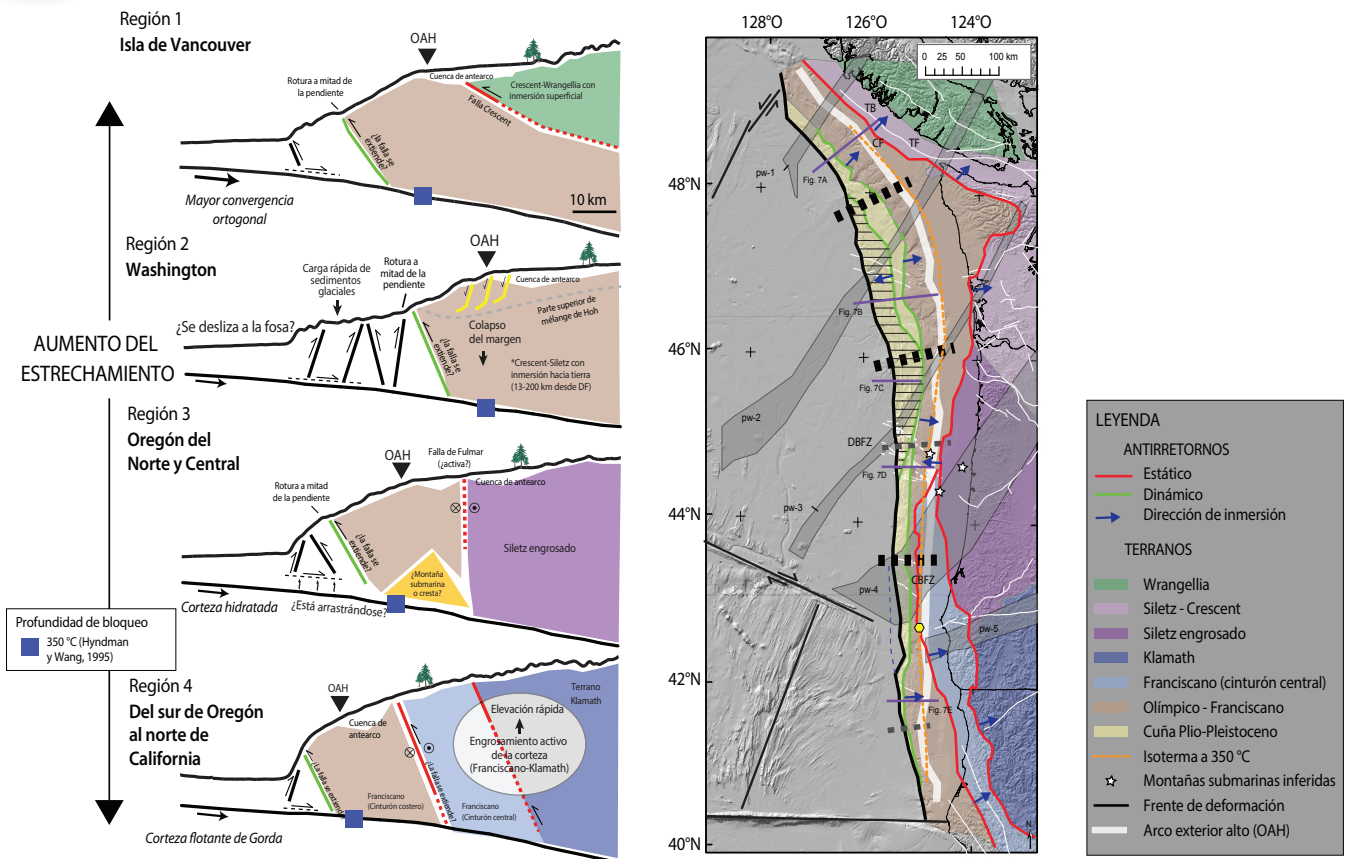
iluminar las interacciones entre la evolución tectónica, las fallas y terremotos, la evolución del paisaje y el paisaje marino y los procesos magmáticos.

En este capítulo se describen las preguntas científicas sobre FEC, la información y las actividades necesarias para abordar esas preguntas, un plan científico por fases y una evaluación de las zonas de subducción más adecuadas para abordar las preguntas científicas de FEC.

## PREGUNTAS CIENTÍFICAS

La pregunta general del componente de los ciclos de fallas y terremotos de SZ4D es: **¿Cuándo y dónde se producen terremotos grandes y dañinos?** Un objetivo principal de los estudios de terremotos es poder predecir las relaciones entre la ubicación geográfica y los peligros de terremotos y tsunamis. La predicción de terremotos específicos puede ser imposible, pero los modelos físicos de fallas son capaces de predecir características importantes del ciclo sísmico cuando se desarrollan en colaboración con estudios de observación y experimentales. Dividimos esta pregunta principal en **cuatro subpreguntas** que se centran en diferentes aspectos del problema del terremoto de la zona de subducción, cada una de las cuales tiene importancia social. Abordar estas cuatro preguntas integrando esfuerzos de observación, de laboratorio y de modelado nos permitirá progresar en el gran desafío de la previsibilidad de terremotos.

- 1 ¿Cómo interactúan los sistemas de fallas de zona de subducción en el espacio y el tiempo? ¿Cómo regulan estos sistemas de fallas y la deformación asociada la evolución y estructura de la zona de subducción?
- 2 ¿Qué controla la velocidad y el modo de deslizamiento en el espacio y el tiempo?
- 3 ¿Se producen deslizamientos precursores distintivos o sismos precursores distintivos antes de los terremotos? ¿Qué causa los sismos precursores o el comportamiento precursor?
- 4 ¿En qué condiciones físicas y por qué procesos se deslizarán durante un terremoto, desplazan el fondo marino y aumentan la probabilidad de generar un tsunami significativo?



**Figura FEC-1.** Síntesis de geomorfología tectónica, cono de cuña exterior y vergencia estructural en el antearco de la zona de subducción de Cascadia. La morfología del antearco está conectada al comportamiento de los Megathrust. De Watt y Brothers (2021).

## Pregunta científica 1 de FEC

¿Cómo interactúan los sistemas de fallas de zona de subducción en el espacio y el tiempo?  
¿Cómo regulan estos sistemas de fallas y la deformación asociada la evolución y estructura de la zona de subducción?

La deformación de la zona de subducción se produce a través de fallas localizadas y la deformación distribuida dentro de la interfaz de la placa, placa superior y placa inferior a escalas temporales que van desde terremotos (segundos) a milenios. Las reacciones entre la deformación de fallas y la deformación distribuida en este sistema son fundamentales para determinar dónde, cuándo y cómo la deformación de la zona de subducción conduce a eventos peligrosos (p. ej., **Figura FEC-1**). Por

ejemplo, el deslizamiento en los Megathrust puede propagarse a las fallas extendidas de la placa superior (Fan et al., 2017; Obana et al., 2018; Coffey et al., 2021), provocar un deslizamiento desencadenado, o ser desencadenados por fallas de deslizamiento en las placas ascendentes y descendentes (p. ej., Dmowska et al., 1988; Bouchon et al., 2016; Lay et al., 2011; Gomberg y Sherrod, 2014; Hollingsworth et al., 2017); fallas corticales de carga a falla (p. ej., Sin amor y Meade, 2010); y desencadenan eventos de remoción en masa y migración de magmas (Linde y Sacks, 1998; Leithold et al., 2017; Roland et al., 2020). La distribución espacial y temporal de los deslizamientos cosísmicos y el posible desencadenamiento de la remoción en masa determinan la generación de tsunamis. La

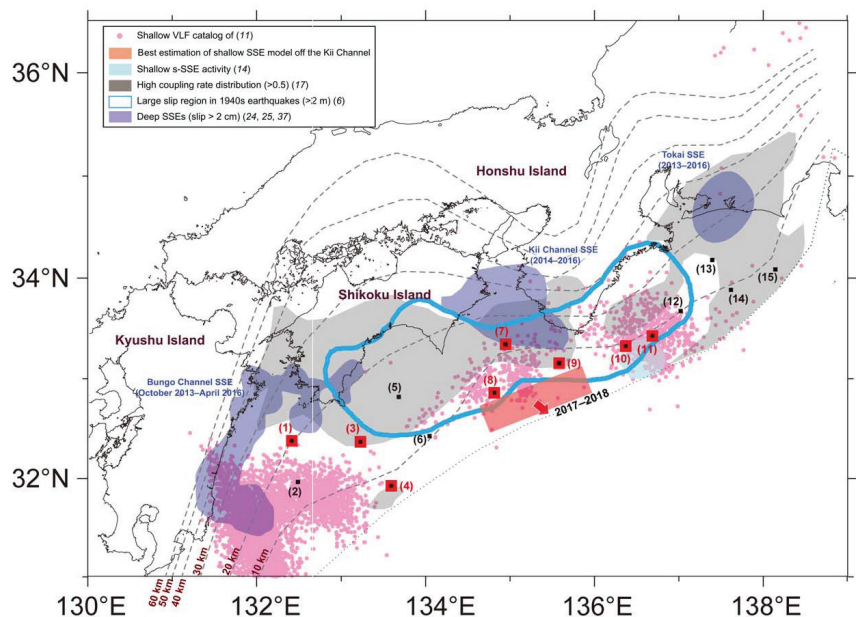
ubicación y el modo de acumulación y liberación de deformaciones en fallas (**Figura FEC-2**) se modulan mediante variaciones espaciales en las propiedades físicas y reológicas de la corteza y el manto en las placas ascendentes y descendentes (p. ej., Wells et al., 2017; Sun et al., 2020, Watt y Brothers, 2021, **Figura FEC-1**), la conectividad hidráulica de los sistemas de fallas (Warren-Smith et al., 2019; Bonini, 2019; Gosselin et al., 2020), y la composición, mecánica, propiedades de los fluidos de los sedimentos subducidos, cuya distribución y entrega son climáticamente, geomórficamente, y controlado tecnológicamente (p. ej., Cordero y Davis, 2003; Sweet y Blum, 2016; Meridith et al., 2017).

Hay varias lagunas en nuestra comprensión de cómo los sistemas de falla de subducción se deforman e interactúan para generar tsunamis, temblores de tierra y eventos de remoción en masa que afectan a los centros de población costera. Por ejemplo, aunque las fallas en las placas ascendentes y descendentes pueden producir grandes terremotos y tsunamis, la geometría, extensión e historial de ruptura de estas fallas, y su conectividad, están menos restringidas que los de Megathrust. Las condiciones de estrés y fluido de poros in situ, y sus variaciones espaciotemporales, son propiedades clave propuestas para

controlar el acoplamiento y las interacciones los deslizamientos a lo largo de Megathrust y otras fallas, pero la medición de estos parámetros requiere instrumentación densa y sistemas de monitorización. Por último, la integración de datos geológicos, geoquímicos, geofísicos y de deformación rocosa es esencial para cuantificar las interacciones de fallas, pero pocas ubicaciones tienen una recopilación y síntesis de datos coordinada que permita análisis a escala de sistema.

SZ4D está preparado de forma única para determinar las condiciones que desencadenan eventos y el papel de las fallas de la placa superior e inferior en la modulación de la acumulación y liberación de deformación asociada a la convergencia de la placa. Para comprender la interacción de fallas en escalas de tiempo cortas y largas, se requiere información detallada sobre las geometrías, el estado de estrés, la distribución de fluidos y las propiedades materiales de los sistemas de fallas de la zona de subducción y la roca circundante. Los requisitos clave incluyen la deformación y el flujo de fluidos de estudios de sismicidad y geológicos de alta precisión, geometrías de fallas y distribución de fluidos de reflexión sísmica y obtención de imágenes electromagnéticas de fuente controlada (CSEM), propiedades de fallas de sistemas de

**Figura FEC-2. Relaciones espaciales entre los diferentes modos de deslizamiento detectados por la instrumentación del fondo marino en la zona de subducción de Nankai.** Área sombreada en gris: regiones con un coeficiente de acoplamiento superior a 0,5. Contorno azul: regiones de deslizamiento alto durante dos eventos M8 en la década de 1940. Rectángulo rojo: ubicación del evento de deslizamiento lento superficial de 2017-2018. Regiones azules: ubicaciones de eventos de deslizamiento lento y profundo. Círculos rosas: ubicaciones de terremotos de muy baja frecuencia. De Yokota e Ishikawa (2020).



fallas exhumados, historial de deslizamientos de registros paleosísmicos y propiedades de materiales de experimentos. Los datos geodésicos son necesarios para restringir la distribución de la deformación entre los sistemas de fallas. El modelado numérico es necesario para determinar las funciones de las propiedades del material y el estado de estrés en las interacciones de fallas, extrapolar a través del espacio y el tiempo, y guiar la recopilación continua de datos. El desarrollo de códigos para los plazos geodinámicos es necesario para comprender los comentarios entre la localización y la formación de fallas, la estructura térmica, la carga desde la convección del manto y las fuerzas tectónicas de la placa, y los relieves terrestres y relieves marinos en evolución.

### Pregunta científica 2 de FEC

#### ¿Qué controla la velocidad y el modo de deslizamiento en el espacio y el tiempo?

El deslizamiento a lo largo de Megathrust de subducción va desde el arrastre continuo hasta la ruptura puntuada característica de los terremotos de subducción mayores. Entre estos dos extremos, hay un espectro de comportamiento de deslizamiento, incluidos los eventos de deslizamiento lento (SSE) cuasi episódicos y los terremotos de baja y muy baja frecuencia (LFE y VLFE). Estos diferentes estilos de deslizamiento determinan si la acumulación y liberación de deformación se expresan violentamente a través de terremotos dañinos o inofensivamente a través de un deslizamiento lento de fallas. Uno de los principales objetivos de SZ4D es comprender los procesos y condiciones físicas que controlan la velocidad y el modo de deslizamiento de fallas y cómo estos procesos y condiciones evolucionan en el espacio y el tiempo.

Desde hace mucho tiempo se ha entendido que el comportamiento de deslizamiento varía espacialmente a lo largo de los Megathrust. La capacidad de medir la deformación en algunas zonas de subducción mediante métodos geodésicos ahora nos permite

distinguir segmentos bloqueados y de tensión acumulada hacia la próxima ruptura del terremoto de otros que se infiere que están menos acoplados sísmicamente o incluso que se deslizan continuamente, e identificar áreas que experimentan SSE cuasi episódicas. Además, el descubrimiento de terremotos “lentos” (p. ej., temblores, VLF) y deslizamiento lento detectado geodésicamente y asísmico demuestra que el comportamiento de deslizamiento es diverso y que el acoplamiento de falla también varía en el tiempo (p. ej., Dragert et al., 2001; Obara, 2002; Frank, 2016). La imagen resultante es compleja, con variaciones sustanciales en los patrones espaciotemporales de bloqueo y liberación de energía de deformación, manifestadas en diferentes estilos de deslizamiento (p. ej., Ito et al., 2013; Ruiz et al., 2014; Yokota e Ishikawa, 2020; **Figura FEC-2**).

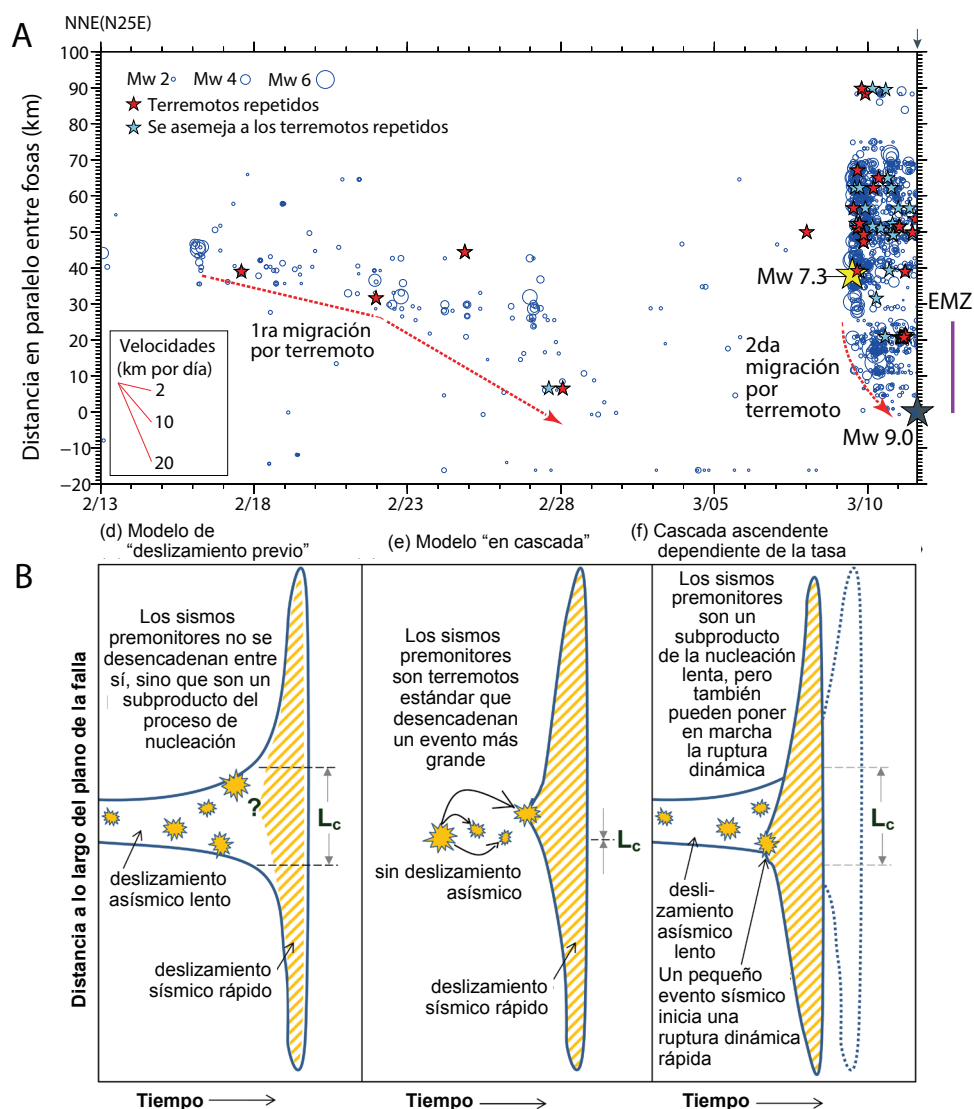
Se han propuesto muchas hipótesis para explicar la distribución del deslizamiento en el espacio y el tiempo. Algunos se centran en las propiedades físicas de los materiales de la zona de fallas, incluida la composición de fallas, la estructura y la reología en escalas de longitud de nanómetros a kilómetros (p. ej., den Hartog y Spiers, 2013; Hawthorne y Rubin, 2013; Ujiie et al., 2013; Saffer y Wallace, 2015; Trütner et al., 2015) y la heterogeneidad que conduce a un comportamiento mixto frágil-dúctil (p. ej., Fagereng y Sibson, 2010; Skarbek et al., 2012; Barnes et al., 2020). Otros estudios sugieren que la distribución y composición de los fluidos porosos y las presiones de los fluidos poros son muy importantes (p. ej., Liu y Rice, 2007; Kitajima y Saffer, 2012; Song et al., 2009; Warren-Smith et al., 2019; Hooker y Fischer, 2021) o se centran en la rugosidad y topografía de la placa descendente (Wang y Bilek, 2011, 2014). Se necesita una evaluación exhaustiva de estos y otros procesos propuestos mediante una combinación de observaciones de regiones bien estudiadas, estudios geológicos de sistemas analógicos, estudios experimentales y modelos numéricos para determinar los controles fundamentales sobre la velocidad y el modo de deslizamiento. Los factores anteriores llevan a nuestra hipótesis general de que la ubicación

y el alcance de los terremotos peligrosos son, en cierta medida, predecibles a partir de las mediciones de acoplamiento, acumulación de deformaciones y comportamiento de deslizamiento pasado.

Responder a la **pregunta 2** y abordar la hipótesis asociada de que las ubicaciones y los tamaños de los terremotos son previsibles en función de las observaciones geodésicas e históricas requiere recopilar esas mediciones de los eventos de deslizamiento en una amplia gama de escalas de tiempo en entornos tanto en tierra como marinos. Se necesita una combinación de instrumentos geodésicos para el fondo marino y sismómetros de fondo del mar densamente distribuidos para adquirir los datos necesarios

marinos de muy alta resolución. El componente terrestre de las observaciones se puede lograr utilizando una combinación de sismómetros terrestres, el Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) y la nueva capacidad de la misión planificada de radar de apertura sintética de la NASA-ISRO (INSAR). Una vez obtenidas estas observaciones fundamentales del comportamiento de la zona de subducción, se necesitará un esfuerzo integrado de modelado numérico, experimental y observacional para comprender los procesos responsables de este comportamiento. Esto incluirá la estructura de mapeo a partir de imágenes geofísicas y mapeo de campo, la recopilación de mediciones de propiedades físicas en fondo de pozo y a partir de núcleos recuperados, el estudio de zonas

**Figura FEC-3.** (A) Evolución espaciotemporal de los sismos precursores (círculos azules) antes del terremoto M9 de Tōhoku-oki del 11 de marzo de 2011. Las líneas discontinuas rojas muestran aparentes frentes de migración de terremotos que se propagan a entre 2 y 10 km por día. Se debe tener en cuenta la clara progresión espaciotemporal tanto a finales de febrero de 2011 como entre el sismo precursor M7.3 y el sismo principal (de Kato y Ben-Zion, 2020, modificado de Kato et al., 2012). (B) Ilustración de posibles modelos de inicio de terremotos y escenarios asociados de sismos precursores que implican un deslizamiento lento sustancial (modelo de deslizamiento previo), relaciones de desencadenamiento estándar (modelo en cascada) o una combinación de los dos (modelo en cascada dependiente de la velocidad). Los experimentos de laboratorio respaldan un proceso de nucleación de terremotos acelerado que se expande a una escala de longitud de nucleación ( $L_c$ ) crítica antes de la ruptura dinámica del sismo principal (de McLaskey, 2019).



de fallas exhumadas en sitios analógicos, la medición de propiedades de materiales en el laboratorio y la determinación del historial de eventos de deslizamiento y tsunamis a partir de paleosismología.

El modelado integrador requiere el desarrollo de códigos comunitarios 3D para simular rupturas dinámicas y el ciclo sísmico, en particular teniendo en cuenta las propiedades realistas y complejas de la geometría y del material, la viscoelasticidad, el rendimiento inelástico y el transporte de fluidos. El aumento de estos códigos y/o modelos de orden reducido asociados, con métodos de asimilación de datos permitirá la integración directa de datos geofísicos.

### Pregunta científica 3 de FEC

**¿Se producen deslizamientos precursores distintivos o sismos precursores distintivos antes de los terremotos? ¿Qué causa los sismos precursores o el comportamiento precursor?**

La mayoría de los terremotos grandes, pero no todos, están precedidos por sismos precursores cercanos en el espacio y el tiempo, lo que sugiere que un proceso preparatorio puede conducir a la eventual descarga principal (p. ej., Bouchon et al., 2013; Trugman y Ross, 2019). Sin embargo, estas secuencias precursoras solo se reconocen actualmente en retrospectiva. Existe un largo historial de investigaciones de tales cambios de sismicidad que condujeron a grandes terremotos, dadas las claras implicaciones para la previsión de terremotos a corto plazo (p. ej., Mogi, 1969; Hardebeck et al., 2008; Brodsky y Lay, 2014; Kato y Ben-Zion, 2020; **Figura FEC-3**). En algunos casos, hay evidencia a partir de observaciones geodésicas o la aparición de microsismos repetidos que indican que dicha actividad precursora de sismos precursores está asociada con un deslizamiento lento (p. ej., Roeloffs, 2006; Kato et al., 2012; Ruiz et al., 2014; Meng et al., 2015; Radiguet et al., 2016; Obara y Kato, 2016; Socquet et al., 2017). Las simulaciones informáticas de ciclos sísmicos

y los experimentos de laboratorio también sugieren que los eventos de deslizamiento lento en o cerca del área de ruptura final pueden ser frecuentes (p. ej., Matsuzawa et al., 2013; Nakata et al., 2016; McLaskey, 2019; Barbot, 2020).

Una mejor comprensión del comportamiento de deslizamiento precursor podría proporcionar una oportunidad para elevar los niveles de alerta de peligro cuando se producen deslizamientos lentos precursores y/o sismos precursores (p. ej., Mignan, 2014). Aunque se han observado deslizamientos lentos transientes espacial y temporalmente relacionados con actividades sísmicas en muchos límites de placas convergentes (p. ej., Liu et al., 2007; Bartlow et al., 2014; Wallace et al., 2017; Colella et al., 2017), la física subyacente sigue siendo poco conocida. Por ejemplo, la migración de los sismos precursores al terremoto de Tōhoku de M9 (**Figura FEC-3A**) es intrigantemente similar a las observaciones sismológicas y geodésicas anteriores al terremoto de Iquique de M8 de 2014 (Ruiz et al., 2014). Sin embargo, no parece haber un patrón universal para la existencia o escalas espaciales y temporales de dicha actividad precursora (p. ej., Bürgmann, 2018, y referencias citadas en el mismo). Como resultado, reconocer y comprender las secuencias precursoras sigue siendo un desafío (Pritchard et al., 2020).

Nuestra hipótesis es que las señales precursoras son distintivas y se correlacionan con ciertas características de grandes terremotos, como la magnitud y el entorno tectónico. Si las señales precursoras deben ser útiles para mitigar el riesgo de peligro, no solo deben ser reconocibles sino también detectables. Un ejemplo de una posible señal precursora es un cambio distintivo en el intervalo de recurrencia de SSE y la tasa de deslizamiento pico de los SSE antes de grandes Megathrust.

La prueba de esta hipótesis requiere adquirir las señales geodésicas y sísmicas que preceden a los terremotos para limitar la deformación durante todo el ciclo sísmico. Debido a que los supuestos precursores pueden ser pequeños y, por lo

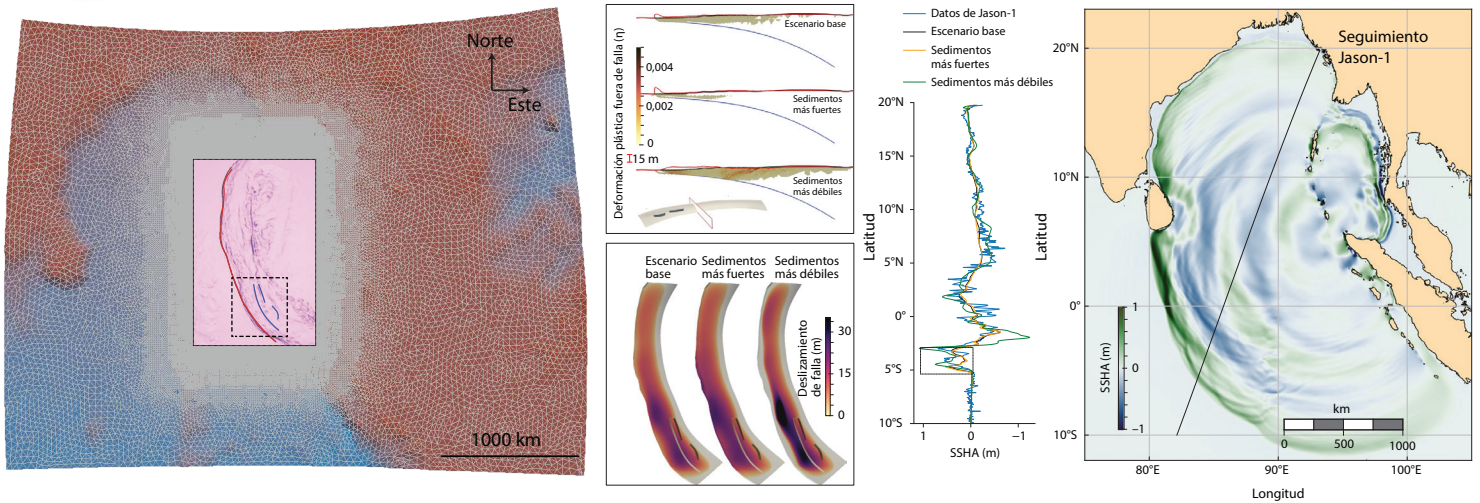
tanto, requieren instrumentos cercanos a la falla, y la parte de los Megathrust donde se inician los terremotos importantes es predominantemente bajo el agua, las observaciones geodésicas y sísmicas del fondo marino serán esenciales y se complementarán con un radar de apertura sintética interferométrica (InSAR), GNSS y sismómetros en tierra. Es igualmente importante ser estratégicos sobre la selección del sitio para esta pregunta porque actualmente no podemos predecir terremotos en función de la ocurrencia de sismos precursores, arrastres transientes u otros fenómenos. Los segmentos de subducción que se sabe que son capaces de terremotos que abarcan zonas sismogénicas y que se encuentran en una fase tardía del ciclo sísmico proporcionan las mejores posibilidades de capturar los datos necesarios. Para maximizar la probabilidad general de delinear definitivamente el alcance o la ausencia de actividad precursora antes de grandes terremotos, es necesario crear una cartera de zonas de subducción instrumentadas aprovechando los esfuerzos de observación internacionales a través de los esfuerzos de SZ4D y las colaboraciones internacionales. Además, necesitamos comprender mejor las señales precursoras en las escalas espacio-tiempo y disciplinares. Los precursores se han identificado con éxito a escala de laboratorio (Yamashita y Ohnaka, 1992; Bolton et al., 2019), en varios entornos tectónicos, y presentan diferentes mecanismos de fallas (Savage et al., 2017; Cabrera et al., 2022; Simon et al., 2021; Duboeuf et al., 2017), y se han propuesto a partir del examen de registros paleosísmicos/morfotectónicos (Hawkes et al., 2005; Cicerone et al., 2009). Las observaciones informativas también pueden incluir la falta de señales precursoras antes de grandes terremotos (p. ej., Wu et al., 2014). Las diversas observaciones precursoras permiten a los modeladores probar hipótesis para la naturaleza de las asperezas y el papel de los controles de fricción, reológicos y geométricos en el comportamiento de deslizamiento a través de la zona sismogénica y por debajo de ella mientras cuestionan la validez de los modelos mecánicos propuestos y su capacidad para capturar el rango de firmas precursoras y transientes a largo plazo antes (y

después) de la deformación.

## Pregunta científica 4 de FEC

**¿En qué condiciones físicas y por qué procesos se deslizarán durante un terremoto, desplazan el fondo marino y aumentan la probabilidad de generar un tsunami significativo?**

Los tsunamis pueden ser acompañantes desastrosos a grandes terremotos de la zona de subducción. Sin embargo, se desconoce qué circunstancias desencadenan grandes desviaciones de fallas en el fondo marino que, a su vez, pueden generar tsunamis mayores. Los factores pueden incluir el bloqueo inusual cerca de la fosa de las placas giratorias y descendentes, la presencia de fallas extendidas dentro de la placa descendente, sedimentos anormalmente gruesos o de baja fricción en la fosa, deformación de cuña de acreción inelástica y baja rigidez de la placa de antearco poco profunda (Cummins y Kaneda, 2000; Seno, 2000; Fujiwara et al., 2011; Lay et al., 2012; Sallares y Ranero, 2019; Kodaira et al., 2020; Du et al., 2021; Wilson y Ma, 2021). También es clave comprender cómo se adapta la convergencia de la placa en el dedo de subducción. ¿Cuánta deformación es inelástica y distribuida frente a localizada como deslizamiento en la falla de desgarre y fallas extendidas? También son de interés los “terremotos con tsunami”, que generan tsunamis más grandes de lo que pueden explicarse fácilmente por las magnitudes de terremotos estimadas a partir del análisis de ondas sísmicas estándar (Kanamori, 1972). Debido a que los terremotos con tsunami son relativamente deficientes en energía de alta frecuencia, son particularmente peligrosos para las poblaciones locales, las cuales son poco probable que se autoevacúen como lo harían en un terremoto con movimiento de tierra que se siente más fuertemente. Los terremotos en la zona de subducción pueden desencadenar deslizamientos de tierra submarinos y subaéreos, lo que puede contribuir aún más a la tsunamigénesis. Tales peligros en cascada constituyen un vínculo importante entre los componentes de FEC y L&S de SZ4D y son



**Figura FEC-4.** Modelo de ruptura dinámica tridimensional con restricciones observacionales y modelos de tsunami de los eventos de Sumatra de 2004 que demuestran la importancia del estrés, la rigidez y los sedimentos para la dinámica del tsunami sísmico. De Ulrich et al. (2022).

una característica de las zonas de subducción en general, como se describe en el **Capítulo 2**.

La principal brecha de conocimiento en los modelos de inundación por tsunami a menudo son los detalles de los procesos de ruptura cerca de fosas que controlan la elevación del fondo marino y, por lo tanto, la generación de tsunamis (Tanioka y Satake, 1996; Satake, 2015; Saito, 2019; Dunham et al., 2020). Trabajos recientes han demostrado vívidamente que anticipar la generación de tsunamis, que depende de la reología de fallas y la rigidez del sistema, requiere datos sísmicos y de estrés precisos y caracterización de rocas (**Figura FEC-4**).

Mejorar nuestra comprensión de las condiciones que generan tsunamis requerirá el uso de registros históricos y/o estudios paleotsunamis para dirigirse a regiones con antecedentes conocidos de tsunamis e instrumentar densamente la región cercana a la fosa. La vinculación de modelos de fuentes sísmicas con modelos de tsunamis (p. ej., Lotto et al., 2019; Madden et al., 2021; Ulrich et al., 2022; **Figura FEC-4**) tiene el potencial de revolucionar nuestra comprensión de cuándo y dónde se produce el tsunamis. Esto puede lograrse incluyendo restricciones en la configuración superficial del límite de la placa adquirida a

partir de imágenes sísmicas de alta resolución y restricciones en las propiedades de fricción de la falla del límite de la placa cerca de la fosa a partir de datos geológicos y experimentales. En particular, nuestro objetivo es probar la hipótesis nula de que la generación de tsunami surge de la deformación elástica cósmica del deslizamiento de fallas, con una posible propagación de ruptura sobre fallas extendidas predecibles a partir del estado de longitud de onda larga de la distribución de estrés y presión de fluido, la estructura del material y las propiedades de fricción.

## ACTIVIDADES NECESARIAS PARA ABORDAR LAS PREGUNTAS CIENTÍFICAS

Los avances recientes en tecnología y la mayor comprensión de los procesos defectuosos posicionan a la comunidad científica para hacer progresos significativos en la respuesta a estas cuatro preguntas. Para ayudar a desarrollar una estrategia para abordar cada pregunta, hemos reunido matrices de *trazabilidad* que evalúan rigurosamente las actividades requeridas (**Apéndice FEC-1**).

Una conclusión de primer orden de las matrices de trazabilidad es que hay muchos puntos en común en la información y las actividades necesarias para responder a las cuatro preguntas científicas de FEC, las cuales se dividen en dos categorías generales:

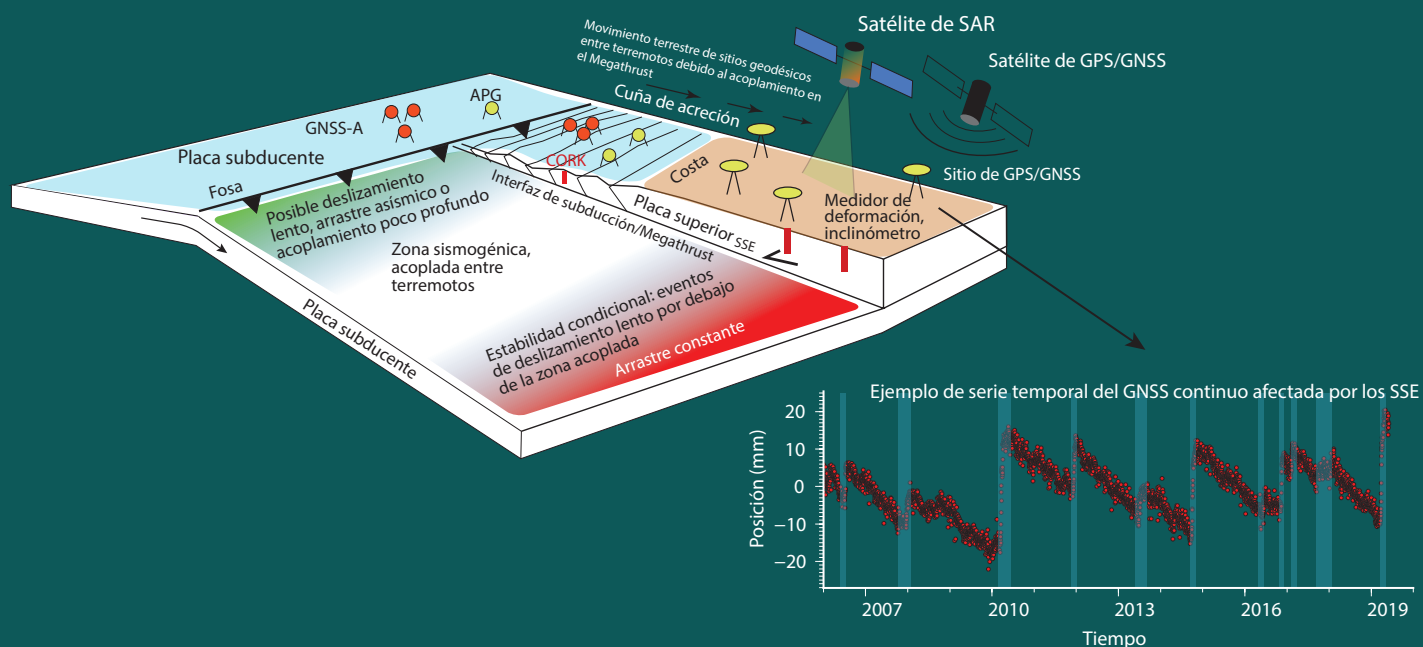
1. **Nuevas observaciones anfibias del comportamiento de la zona de subducción, y**
2. **Innovadoras actividades de observación, geológicas, experimentales y de modelado para comprender qué controla el comportamiento de la zona de subducción.**

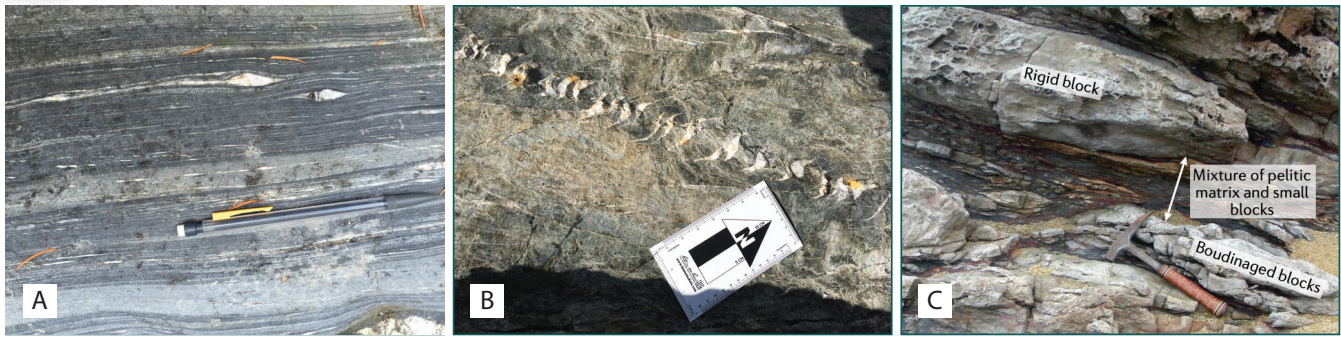
Se necesita un ambicioso esfuerzo de instrumentación geofísica para adquirir datos que puedan proporcionar una caracterización completa del comportamiento de deslizamiento de la zona de subducción en una gama de escalas temporales y espaciales, incluidas las relaciones entre el acoplamiento geodésico, la sismicidad, temblores y otros tipos de comportamientos de deslizamientos (p. ej., **Figura FEC-5**). Los datos

históricos, paleosismológicos y geomorfológicos son necesarios para crear registros geológicos completos de los terremotos y deformaciones de la zona de subducción, estimar las tasas de los procesos geológicos y proporcionar contexto para el comportamiento actual de fallas.

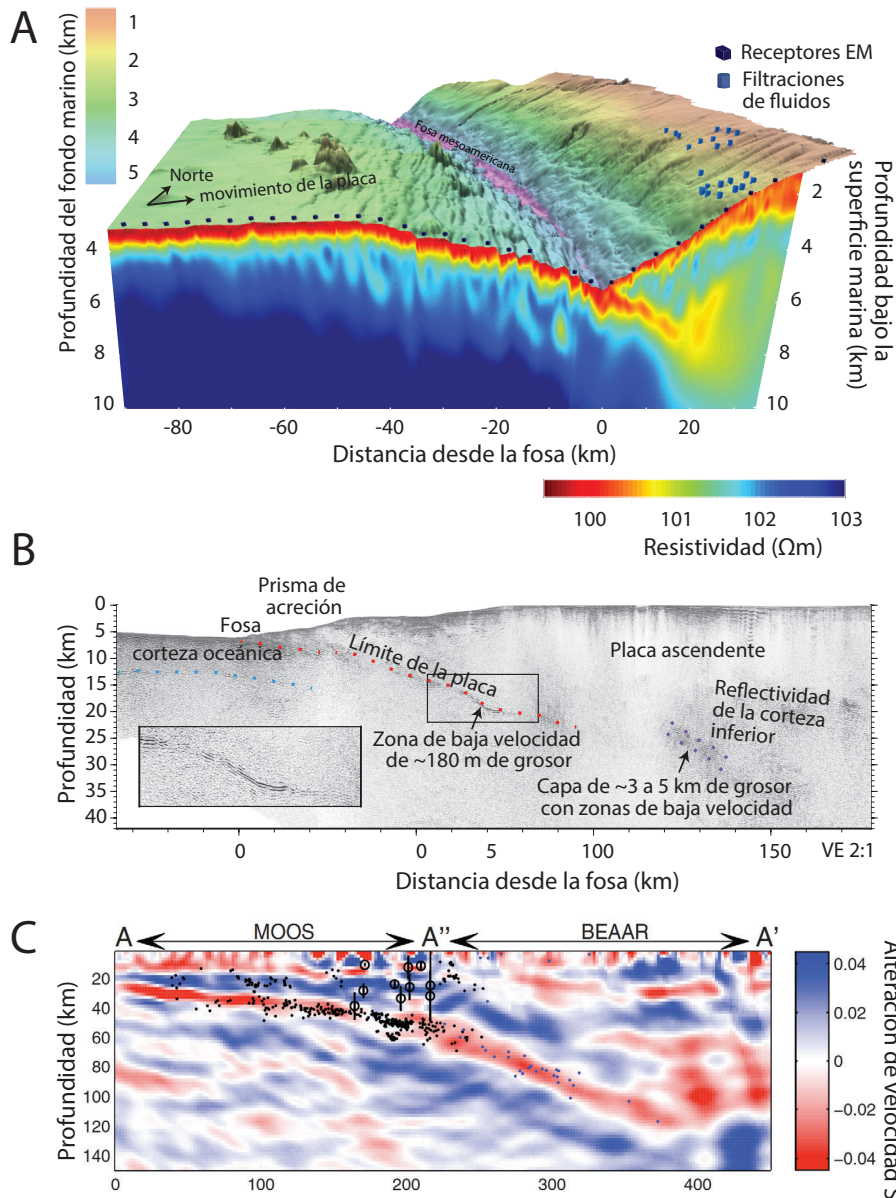
Comprender los procesos y las propiedades que controlan el comportamiento del sistema de fallas en el rango de escalas relevantes requerirá una estrecha integración de estudios geológicos in situ y analógicos para integrar la estructura, condiciones, y procesos en escalas temporales y espaciales (p. ej., **Figura FEC-6**); datos de imágenes geofísicas de alta resolución para caracterizar la arquitectura de la zona de subducción y las propiedades de la zona de fallas (p. ej., **Figura FEC-7**); experimentos novedosos que miden las propiedades del material y simulan procesos en condiciones actualmente inaccesibles en el laboratorio (**Figura FEC-8**); y el desarrollo de modelos numéricos para probar hipótesis en escalas espaciales y temporales y evaluar la interconexión de los procesos del sistema de subducción.

**Figura FEC-5.** Una ilustración esquemática de los tipos de deslizamiento en una interfaz de placa de subducción y las mediciones geodésicas que se pueden utilizar para restringir estos comportamientos. El comportamiento real de la zona de subducción puede variar significativamente con respecto a este simple diagrama. APG = Manómetro de presión absoluta. CORK = Observatorio debajo del fondo marino. GNSS = Sistema global de navegación por satélite. SAR = Radar de apertura sintética. De Wallace et al. (2021).

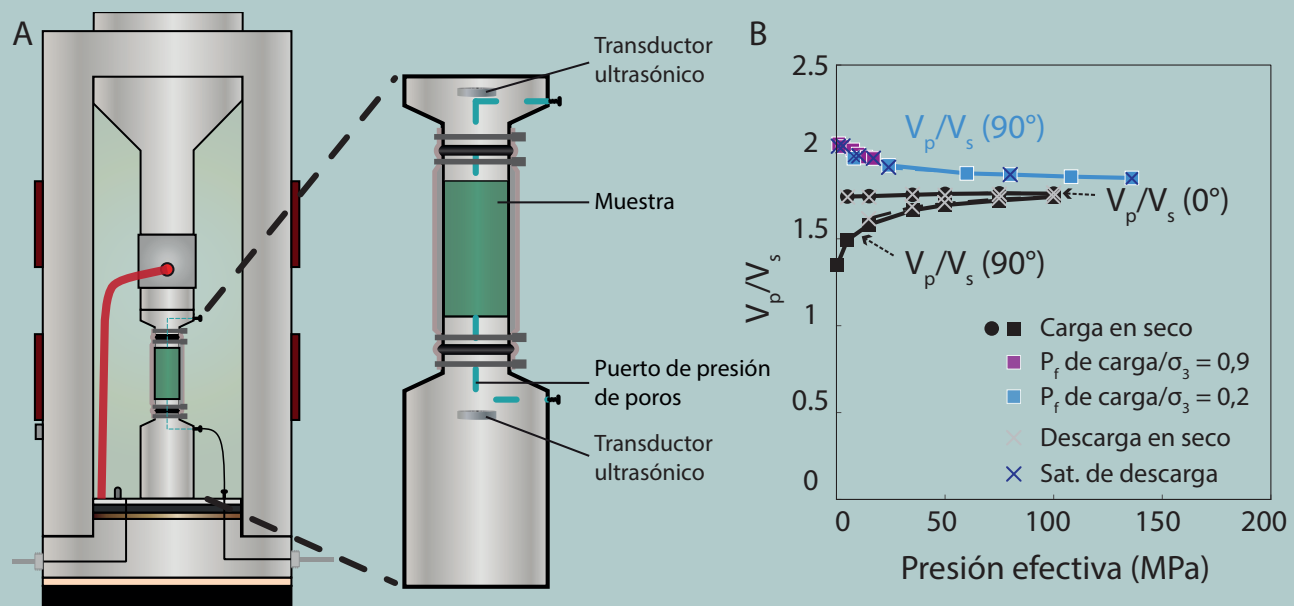




**Figura FEC-6.** Fotos de campo de rocas de zona de subducción exhumadas: (A) milonita del empuje de paleo subducción del río Leech, Isla de Vancouver, BC, Canadá; (B) venas escalonadas de la Zona Arosa, Alpes suizos; (C) deformación distribuida en una mezcla acrecentada, playa Chrystalls, Nueva Zelanda (de Kirkpatrick et al., 2021).



**Figura FEC-7.** Imágenes geofísicas complementarias de la geometría y las propiedades de los límites de la placa mediante (A) imágenes CSEM (de Naif et al., 2016), (B) imágenes de reflexión sísmica (de Li et al., 2015) y (C) imágenes funcionales del receptor (de Kim et al., 2014).



**Figura FEC-8.** (A) Un aparato de deformación triaxial utilizado para medir las propiedades de la roca en el laboratorio, en este caso velocidades de onda elástica en los dispositivos metasedimentales; (B)  $V_p/V_s$  determinado a partir de las mediciones del laboratorio para su comparación con la tomografía sísmica. De Fliedner y French (2021).

Los esfuerzos coordinados, anfibios e interdisciplinarios descritos anteriormente requieren una infraestructura humana y física significativa. **Nuestras prioridades más altas para la infraestructura física cercana al futuro son la instrumentación sísmica y geodésica para medir el comportamiento de Megathrust; aparatos de deformación experimentales capaces de simular las condiciones del fluido, presiones, temperaturas, y las tasas de deformación necesarias para estudiar los procesos que controlan los peligros de fallas y terremotos en las zonas de subducción, pero que actualmente son inaccesibles con el equipo experimental existente; e infraestructura de campo para respaldar un esfuerzo coordinado y sostenido para caracterizar sistemas de fallas modernos y analógicos.** También enfatizamos la necesidad urgente de otras infraestructuras y actividades para crear retratos completos de geometrías, propiedades e historias de fallas de zonas de subducción, todos los cuales son esenciales para proporcionar contexto para los resultados que surgirán de la infraestructura geofísica y experimental de SZ4D.

Basándonos en las *matrices de trazabilidad*, hemos creado un plan científico integrado, que incluye actividades de observación, experimentales y numéricas, que se describen en la siguiente sección.

## DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PLAN CIENTÍFICO

Las preguntas científicas y las *matrices de trazabilidad* proporcionan un marco para definir la estrategia y la escala del componente de ciclos de fallas y terremotos de SZ4D. Abordar las preguntas científicas de FEC requiere:

1. Un ambicioso esfuerzo de observación geofísica para caracterizar el comportamiento de fallas en toda la zona sismogénica, y
2. Modelado, estudios geológicos, trabajo experimental y obtención de imágenes geofísicas para contextualizar y comprender los procesos físicos subyacentes al comportamiento de fallas.

La estrecha integración de estos componentes requiere un proceso de planificación coordinado a lo largo de SZ4D y una fase de actividades.

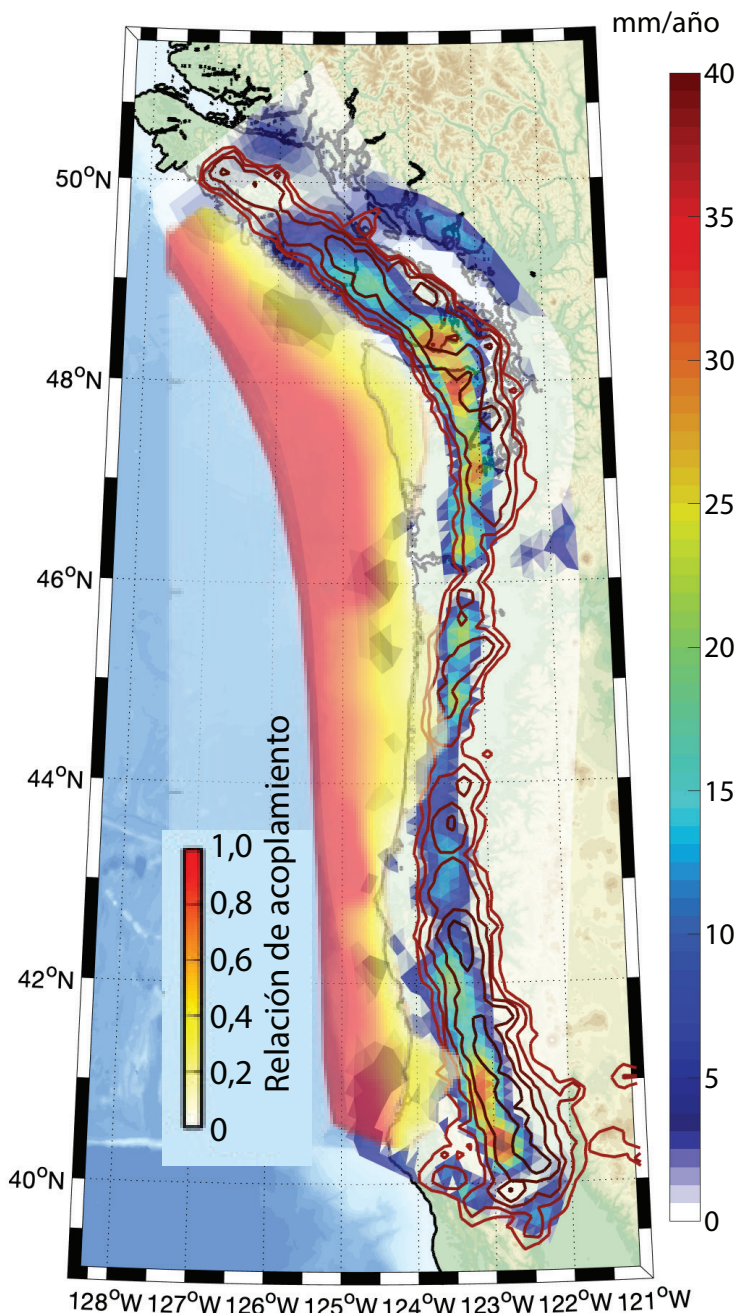
Aunque los detalles específicos dependerán de las regiones seleccionadas para el despliegue de instrumentos y el estudio de campo, se puede anticipar el diseño general y la fase de actividades para lograr los objetivos del proyecto.

El componente principal del esfuerzo de observación geofísica de FEC es una red geodésica y sísmica anfibia (en adelante denominada MegaArray). Nuestro enfoque en los grandes terremotos requiere limitar la cinemática del deslizamiento a lo largo y ancho de un segmento sismogénico, incluidas las regiones ascendentes y descendentes de la zona sismogénica, regiones de comportamiento de transición y otras fallas en las placas ascendentes y de entrada (~500 x 500 km). Se espera que las variaciones espaciales en la deformación a lo largo de esta escala controlen dónde se puede acumular suficiente energía elástica para romperse en un terremoto de magnitud aproximadamente 8 o mayor. Del mismo modo, los grandes eventos de deslizamiento lento, incluidos los que se supone que son precursores de grandes terremotos de zonas de subducción, abarcan ~100 km (p. ej., Ito et al., 2013) y, por lo tanto, también requieren una gran área de estudio. Por otro lado, también se requiere conocimiento de la ubicación de la fuente del terremoto con alta precisión y mediciones detalladas de deslizamiento lento para examinar la interacción de fallas (**Pregunta 1**) y las relaciones entre los diferentes modos de deslizamiento (**Pregunta 2**). Para satisfacer estas dos necesidades, describimos un esfuerzo por fases para MegaArray que implica la caracterización central en toda el área del estudio (fase 2a) seguido de observaciones densificadas en áreas de interés (fase 2b; **Figura FEC-10**). Para garantizar que se conoce el contexto regional tridimensional completo de las fallas, también se requieren datos complementarios adicionales sobre el impacto de MegaArray, incluido el mapeo batimétrico y la obtención de imágenes geofísicas.

Los esfuerzos geológicos, de modelado y experimentales deben coordinarse con la fase de la MegaArray, tanto para informar el diseño de las diferentes fases de la red instrumental como para interpretar los resultados que surgen

de ella. El trabajo geológico seguirá una fase paralela que implica la caracterización, muestreo y prueba del sitio central, seguida de una caracterización densificada de los procesos de deformación, las propiedades de la roca y el historial de deslizamiento (**Figura FEC-10**). El trabajo experimental seguirá una fase similar y evolucionará a medida que se disponga de nuevas observaciones y muestras y a medida que se desarrolle el equipo.

El modelado colaborativo para la subducción ha identificado varias necesidades críticas para facilitar el modelado relacionado con FEC (Dunham et al., 2020). Estos incluyen códigos de modelado de ciclo sísmico comunitarios que acoplan el deslizamiento de fallas de la zona de subducción con procesos adicionales relevantes (viscoelasticidad, rendimiento inelástico, transporte de fluidos, presión de poros, evolución de la temperatura y generación de tsunamis), que son necesarios para la evaluación de peligros sísmicos basada en la física y las capacidades de advertencia temprana. También serán necesarios para comprender los vínculos entre los comportamientos y las estructuras de la zona de subducción, y para comprender los procesos y probar cuantitativamente las hipótesis. Los resultados dependerán del estado de estrés y de la estructura del material, lo que motivará el desarrollo de códigos para una geodinámica a mayor escala temporal que tenga en cuenta los comentarios sobre la evolución de la tierra y el paisaje marino, la localización de la deformación y la formación de fallas, la estructura térmica y la carga de las fuerzas tectónicas de la placa y la convección del manto. El modelado a escala regional debe combinarse con el modelado geodinámico global para tener en cuenta procesos como el retroceso de fosas. El desarrollo y la utilización de estos códigos pueden comenzar inmediatamente y se prevé que se extiendan a todas las fases del esfuerzo de instrumentación de SZ4D, con esfuerzos de modelado centrados en momentos específicos para ayudar a guiar el diseño de la red instrumental y la interpretación de los datos como se describe posteriormente en el plan de fases.



**Figura FEC-9.** Comparación de acoplamiento de placa detectado geodésicamente (colores rojo a amarillo), deslizamiento lento detectado geodésicamente (colores arcoíris, notificado como tasa de deslizamiento promedio a largo plazo) y temblor tectónico detectado sísmicamente (contornos marrones) en la zona de subducción de Cascadia a partir de datos sísmicos y geodésicos en tierra existentes (Bartlow, 2020). El modelo de acoplamiento es de Schmalzle et al. (2014), y el temblor tectónico es del catálogo de la Red sísmica del noroeste del Pacífico (Wech, 2010).

En general, se han definido tres fases principales de las actividades para la implementación del proyecto, que son paralelas a las otras partes de SZ4D y se resumen a continuación. Durante las tres fases del programa, las observaciones instrumentales y de campo, los experimentos de laboratorio y el modelado numérico se informarán mutuamente (p. ej., planificación de la adquisición de nuevos datos y planificación de nuevos experimentos y modelos). Los detalles sobre las actividades previstas para cada fase se proporcionan en el **Apéndice FEC-2**. Aunque todos los componentes deben estar estrechamente coordinados, la fase puede tener lugar en diferentes plazos dictados por necesidades específicas y oportunidades de financiación. Además, es necesario que el análisis y la integración de todos los componentes estén en curso durante todo el programa de SZ4D.

**FASE 0** es una fase preparatoria para desarrollar y perfeccionar los planes de implementación de SZ4D. Esta fase incluye evaluar la infraestructura existente en posibles áreas de estudio e identificar cómo SZ4D puede desarrollarse estratégicamente sobre ellas, y centrar los esfuerzos de modelado para informar el diseño de futuros programas de observación. Esta fase también implicará la creación de asociaciones con posibles socios nacionales e internacionales.

**LA FASE 1** incluye:

1. Síntesis y análisis de datos existentes, modelado y trabajo experimental con capacidades existentes destinadas a abordar preguntas científicas de FEC;
2. Desarrollo de tecnologías para garantizar la disponibilidad de instrumentación adecuada y capacidades de laboratorio y modelado; y
3. Tareas organizativas y de planificación continuas para desarrollar y fortalecer asociaciones. Debido a que esta fase aprovecha los datos existentes, puede y debe tener un gran alcance geográfico.

Una gran cantidad de datos existentes de muchas zonas de subducción nos da la oportunidad de progresar hacia los objetivos de SZ4D durante la fase 1 antes de la disponibilidad de nuevas observaciones dedicadas o capacidades experimentales. Aunque el volumen y la calidad de los datos existentes varían enormemente entre las zonas de subducción, son necesarios estudios comparativos para generalizar los resultados de cualquier zona de subducción específica a los procesos de subducción generales. Por ejemplo, los estudios deben incluir:

1. Mapeo de la arquitectura del sistema de fallas de límite de la placa y determinación de las propiedades de la zona de fallas;
2. Limitar el estado térmico de la zona de subducción a partir de los datos térmicos disponibles; y
3. Evaluación de las entradas de la zona de subducción, incluidos el espesor y la composición de los sedimentos, la porosidad, la heterogeneidad y la rugosidad de la placa entrante. La compilación, el reprocesamiento selectivo y la integración de los datos existentes ayudarán a evaluar la importancia de estos objetos observables y resaltarán las brechas de datos críticas.

Del mismo modo, la reevaluación e interpretación de los datos geofísicos existentes sobre el comportamiento de deslizamiento de la zona de subducción se puede utilizar para abordar preguntas científicas de FEC y guiar la planificación para la adquisición de datos futuros. Por ejemplo, el empleo de nuevos métodos (p. ej., técnicas de aprendizaje automático) puede mejorar la identificación de eventos de deslizamiento lento y terremotos lentos (p. ej., **Figura FEC-9**) y puede avanzar en la caracterización de la incertidumbre en las estimaciones del acoplamiento de fallas y los parámetros fuente de terremotos.

Las simulaciones numéricas de múltiples ciclos desempeñarán un papel importante en la predicción de qué resultados se pueden

generalizar, ya que la cartera global de zonas de subducción cubre la totalidad del ciclo sísmico (inter, pre, co y postsísmico); estos esfuerzos deben comenzar en la fase 1 y continuar a lo largo de SZ4D. Se realizará un modelado numérico inicial utilizando las capacidades actuales para los sitios objetivo para establecer atributos del sistema integradores a gran escala.

Los esfuerzos geológicos y experimentales también deben comenzar en la fase 1. Para proporcionar patrones temporales a largo plazo de terremotos, recurrencia de paleotsunamis y extensión de inundaciones, patrones espaciales de intensidad de agitación, dimensiones de ruptura a lo largo del impacto y el componente vertical del ciclo de deformación de los terremotos, se pueden realizar estudios paleosismológicos inmediatamente e integrados con conjuntos de datos geológicos y geofísicos complementarios (p. ej., Clark et al., 2019; Walton et al., 2021). También se necesita una recopilación de estudios existentes de rocas de subducción exhumadas y los procesos que registran para fundamentar las decisiones sobre la priorización de nuevas mediciones y la recopilación de datos (p. ej., Phillips et al., 2020). Esta compilación resumiría las condiciones de deformación, la estructura, la composición y las propiedades de los fluidos y la evidencia correspondiente de los procesos de deformación en todo el rango de condiciones desde el fondo marino hasta la caída de la zona sismogénica (Rowe et al., 2013; Agard et al., 2018; Behr y Burgmann, 2021; Kirkpatrick et al., 2021). Se requerirá un trabajo de reconocimiento específico para restringir las propiedades y procesos no documentados de posibles sitios analógicos. Las comunidades experimentales pueden realizar investigaciones sobre las muestras disponibles y en las condiciones de los equipos de laboratorio existentes y sintetizar los datos experimentales existentes.

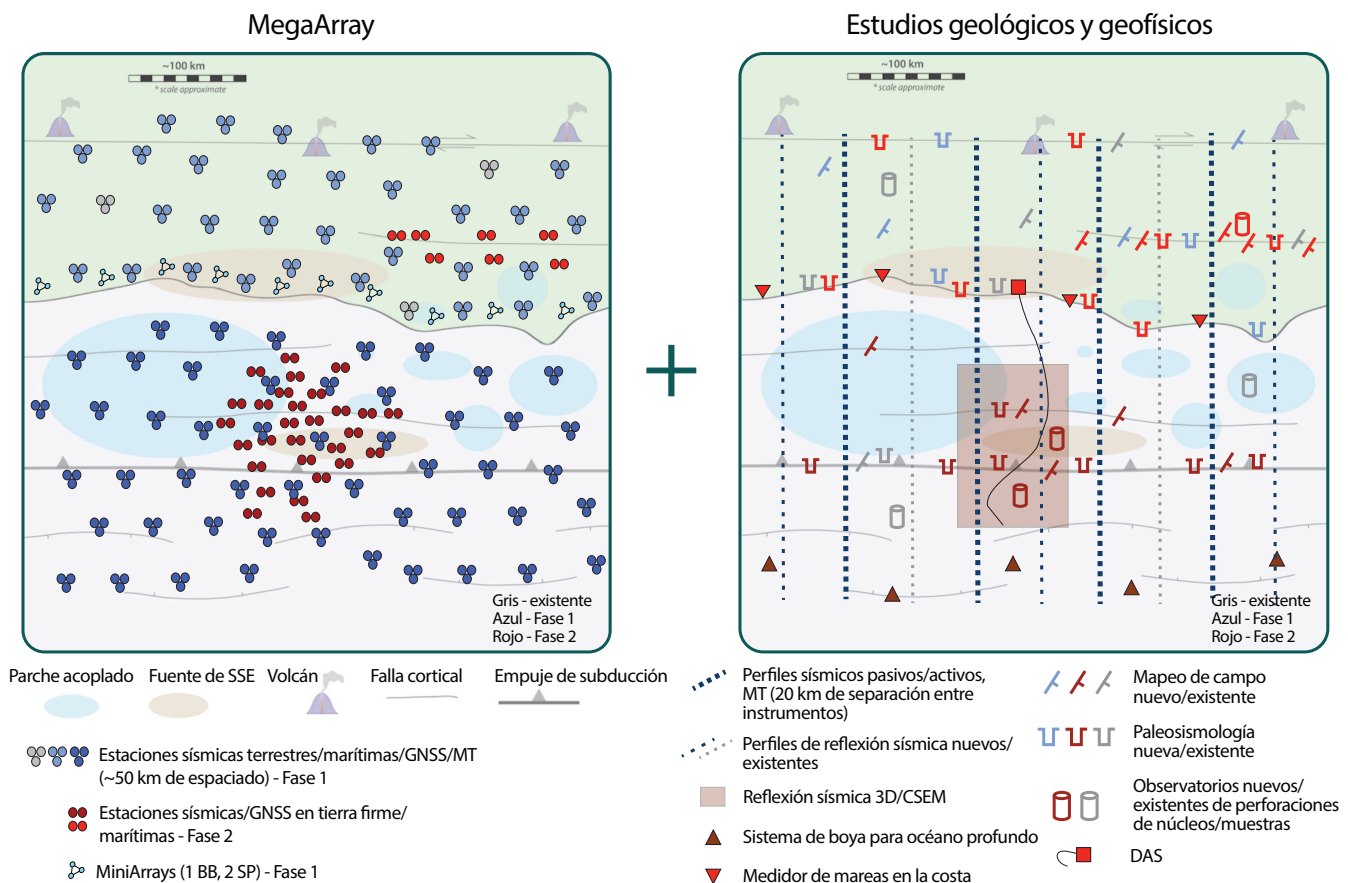
La fase 1 también implicará el desarrollo de infraestructura necesario para las observaciones de la fase 2. Los ejemplos incluyen el desarrollo de sismómetros de fondo oceánico capaces de registrar durante 5 a 10 años, y aparatos

experimentales capaces de medir propiedades físicas en todo el rango de presiones y temperaturas de la zona sismogénica, así como condiciones relevantes para el deslizamiento lento y los temblores. A pesar de los rápidos avances en la (super)computación y el modelado basado en datos, actualmente no existen modelos físicos completos que capturen todos los flujos de datos de observación y de laboratorio planificados. La comunidad de modelado identificará los métodos numéricos y el desarrollo de modelos específicos necesarios para manejar el aumento previsto en el volumen y la diversidad de datos, la resolución de datos sin precedentes y las incertidumbres asociadas

esperadas de los experimentos propuestos. También es necesario definir las necesidades de infraestructura para un esfuerzo geológico en tierra ambicioso y coordinado.

Las actividades organizativas implicarán el fortalecimiento de las asociaciones. Las colaboraciones internacionales son esenciales para el alcance global del proyecto de SZ4D. Los esfuerzos de SZ4D para comprender los procesos subyacentes a los peligros geológicos complementan el trabajo de las agencias científicas estadounidenses sobre caracterización y mitigación de peligros. Por último, las conversaciones con los operadores

**Figura FEC-10.** Ilustración de la adquisición teórica ideal de datos geofísicos y geológicos de sitio activo durante los despliegues de fase 2a (símbolos azules) y fase 2b (símbolos rojos). El panel izquierdo muestra MegaArray y el panel derecho muestra estudios geológicos y geofísicos necesarios para proporcionar contexto para MegaArray. Se debe tener en cuenta que la red sísmica/geodésica anfibia central desplegada durante la fase 2a permanecería en su lugar durante la fase 2b. La fase 2a aprovecharía los datos existentes (símbolos grises). La paleosismología incluye fosas, inundación costera, sacudidas/desplomes de masas y levantamiento de terraplenes/corteza. Además, también se necesitan datos marinos de batimetría y datos de InSAR en tierra en toda el área del estudio. SSE: Evento de deslizamiento lento, MT: Magnetotélúrico, CSEM: Fuente electromagnética controlada, DAS: Detección acústica distribuida, GNSS: Sistema global de navegación por satélite.



y propietarios de cables marinos podrían potencialmente abrir capacidades de detección que serían imposibles bajo cualquier otra circunstancia.

**LA FASE 2** incluirá nuevos programas de observación junto con estudios experimentales y numéricos. Los componentes de observación y experimentales se dividen en dos partes. La primera parte (fase 2a) implicará una menor resolución, caracterización central del comportamiento y la estructura de la zona de subducción en toda el área del estudio, mientras que la segunda parte (fase 2b) implicará una caracterización detallada y de mayor resolución en las áreas de interés (**Figura FEC-10**).

El corazón del esfuerzo geofísico de fase 2 es la MegaArray anfibia, cuyo objetivo es caracterizar el bloqueo geodésico y el comportamiento de deslizamiento (p. ej., terremotos, eventos de deslizamiento lento). MegaArray es la pieza central del esfuerzo de observación y el componente de mayor prioridad de la infraestructura geofísica prevista. Para abordar las preguntas científicas de FEC, esta red instrumental debe abarcar un área mínima de aproximadamente 500 x 500 km, que se extiende desde ~100 km hacia el mar de la fosa hasta el retroarco. Dada esta escala significativa, el objetivo de MegaArray durante la fase 2a es capturar el comportamiento a resolución intermedia (~40–50 km); MegaArray comprenderá una red central de instrumentos geodésicos y sísmicos terrestres y marinos durante un mínimo de 5–10 años. Según los resultados de la fase 2a, se desplegará instrumentación adicional para densificar MegaArray durante la fase 2b para obtener restricciones de mayor resolución en el comportamiento de deslizamiento en áreas más pequeñas de interés, como parches de deslizamiento lento o lugares donde podría haber cambios en el acoplamiento de fallas (**Figura FEC-10**). La parte de MegaArray implementada en la fase 2a permanecerá en su lugar durante la fase 2b, y la red combinada de MegaArray funcionará durante al menos otros cinco años.

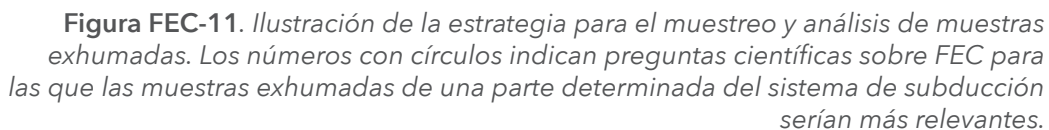
Los procesos subyacentes a la deformación activa observada pueden entenderse mejor con mediciones geológicas de apoyo; perfiles electromagnéticos, sísmicos de fuente activa y de flujo de calor; mapas batimétricos de franjas; y datos de SAR (**Apéndice FEC-2**), y estos seguirán una fase similar a MegaArray, con caracterización central durante la fase 2a y esfuerzos más detallados en la fase 2b. Es posible que algunos de los conjuntos de datos necesarios para la fase 2a ya existan o puedan ser adquiridos por socios nacionales o internacionales y pueden ser aprovechados por SZ4D.

La fase 2a incluirá la obtención de imágenes geofísicas activas/pasivas de la arquitectura de la zona de subducción en la misma huella que la MegaArray para determinar las geometrías y propiedades de Megathrust y otras fallas y caracterizar las placas superior y de subducción (p. ej., **Figura FEC-7**). Durante la fase 2b, se realizarán imágenes geofísicas de mayor resolución en áreas de interés, especialmente en áreas de instrumentación densificada para MegaArray (**Figura FEC-10**). Una posible oportunidad es el uso de despliegues nodales sísmicos en el fondo marino, que actualmente no son comunes en estudios académicos.

Durante la fase 2a, se identificarán y tomarán muestras de los sitios analógicos exhumados en tierra relevantes, y se pueden realizar experimentos de laboratorio en materiales de referencia, marinos y terrestres a medida que avanza el muestreo (**Figuras FEC-10 y FEC-11**). Las muestras recogidas de los centros regionales y analógicos se analizarán, así como materiales de referencia adicionales. También se llevarán a cabo estudios de paleosismología para limitar mejor las roturas por Megathrust y fallas de la placa superior. Durante la Fase 2b, continuarán los estudios de análogos exhumados en tierra y experimentos de laboratorio, pero serán más dirigidos a abordar las observaciones emergentes de los esfuerzos de instrumentación y modelado. También se recopilarán observaciones geológicas dirigidas e intensivas, incluidos estudios de caracterización de fallas más densos y paleosismología. Otro

A lo largo de la Fase 2, continuarán los modelos numéricos, analíticos y estadísticos que incorporen los datos y resultados recién adquiridos y complementarán las observaciones, y guiarán aún más la densificación y expansión de las observaciones para la Fase 2b. El modelado de los procesos de deformación continuará y se actualizará a medida que se adquieran datos de alta resolución.

experimentos y modelos numéricos de los esfuerzos de las fases 2a y 2b de FEC y los de otras partes de SZ4D. Se requiere un esfuerzo de síntesis significativo y dedicado tras la finalización de la mayoría de los aspectos del programa de observación para integrar los resultados de los componentes interdisciplinarios de SZ4D y abordar las preguntas científicas. Esta fase también implicará la integración de los resultados de SZ4D en las evaluaciones de peligros regionales en colaboración con las partes interesadas locales.



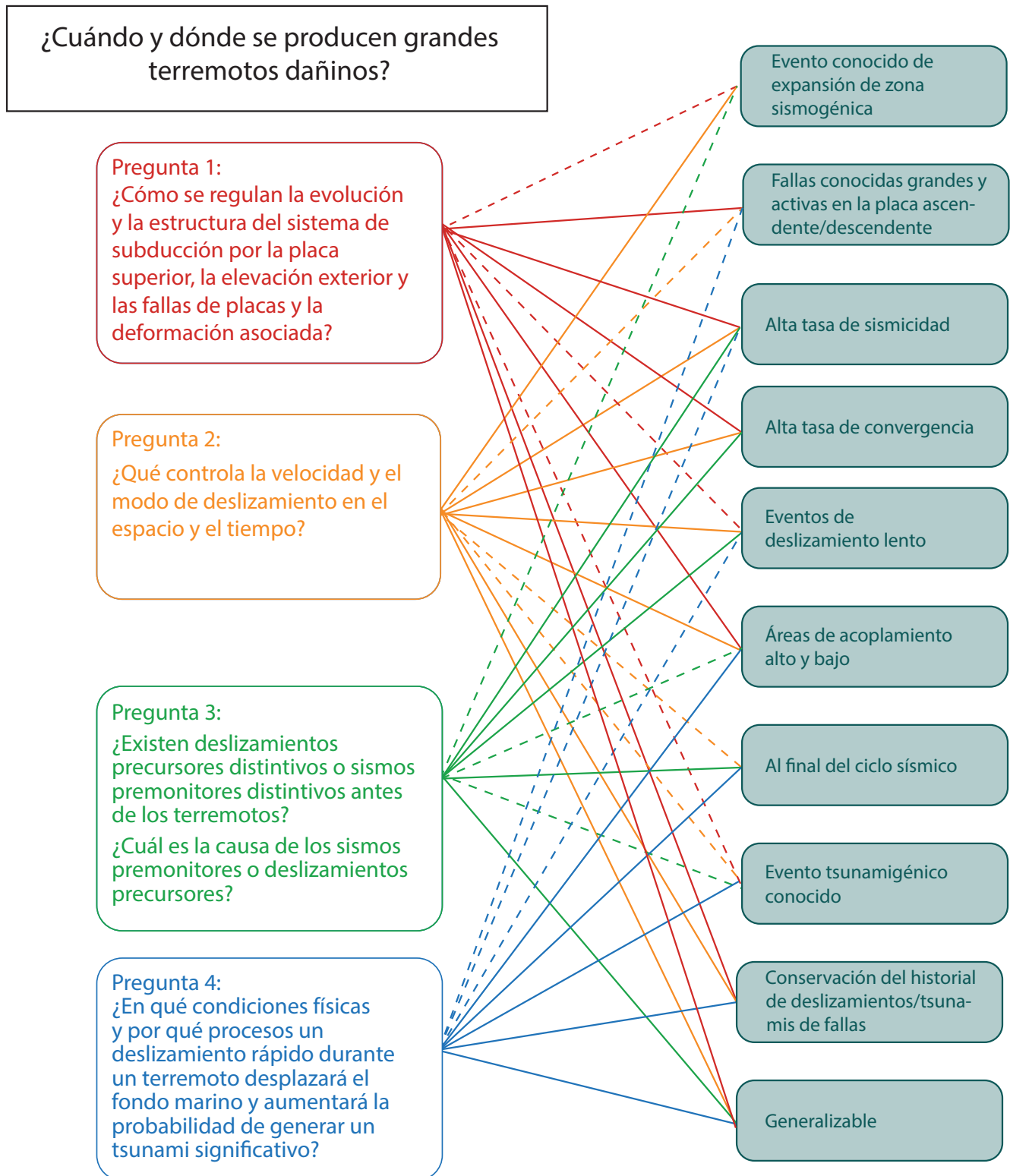
### ESTRATEGIA DE CARTERA Y SELECCIÓN DE SITIOS

Para abordar todas las preguntas científicas de FEC, las nuevas observaciones de los sistemas de zonas de subducción activa son críticas y es necesaria una estrategia para definir el conjunto de sitios. Nuestra estrategia es construir una cartera de sitios capaces de producir grandes terremotos y tsunamis de zonas de subducción y que tengan zonas de fallas bloqueadas. Los sitios también deben mostrar variabilidad en el modo y la velocidad de deslizamiento dentro y entre ellos. Los datos recopilados de esta cartera de sitios se utilizarán para comprender los controles sobre el comportamiento de los deslizamientos en Megathrust y en otras fallas de la zona de subducción. El conocimiento del acoplamiento sísmico es importante para abordar las cuatro preguntas científicas; el grado en que las placas están bloqueadas afecta a todos los aspectos del ciclo sísmico, así como al paisaje relacionado y los procesos volcánicos. **La pregunta 3** sobre precursores de terremotos exige estudiar un conjunto de sitios para maximizar el éxito. Para esta pregunta en particular, la etapa en el ciclo sísmico es un factor importante en la selección del sitio para programas de observación enfocados de SZ4D. Esperamos depender en gran medida del aprovechamiento de socios internacionales para garantizar que la cartera global colectiva de zonas de subducción instrumentadas capture información clave.

Guiado por las preguntas científicas y la Matriz de trazabilidad (**Apéndice FEC-1**), que especifica las mediciones detalladas necesarias para abordar las preguntas científicas, se desarrolló una lista de atributos científicos requeridos (**Figura FEC-12**). Se debe tener en cuenta que todos los atributos de alta prioridad se pueden rastrear a las preguntas científicas (**Figura FEC-12**). Un subconjunto de estos criterios es relevante para el peligro asociado con una zona de subducción en particular, que es relevante para la misión general de SZ4D y para posibles socios nacionales e internacionales. Se reunió un inventario de

zonas de subducción que tabula estos atributos de alta prioridad para las principales zonas de subducción de la Tierra (**Apéndice FEC-3**) y, por lo tanto, se puede utilizar para informar la toma de decisiones sobre la selección de sitios. Según nuestra compilación, puntuamos cada zona de subducción en función de lo bien que satisface un criterio científico determinado, ponderando cada criterio en función del número de preguntas científicas para las que es relevante (**Figura FEC-12**) y de la relevancia de esos criterios para el peligro de la zona de subducción. Consulte el **Apéndice FEC-3** para obtener más detalles. Los umbrales de esta puntuación son arbitrarios, y las puntuaciones totales dadas a una zona de subducción en particular variarían si se eligieran diferentes umbrales; en consecuencia, la puntuación específica dada a cualquier zona de subducción en particular no es significativa. Otros factores importantes para identificar posibles sitios del estudio incluyen la consideración de solapamientos con otros componentes de SZ4D, las prioridades de posibles socios nacionales e internacionales y partes interesadas locales, la disponibilidad de datos e infraestructura existentes y consideraciones logísticas.

La selección de los centros en el **Apéndice FEC-3** destaca algunas regiones que serían particularmente favorables para abordar las preguntas científicas de FEC. Varios segmentos de zonas de subducción a lo largo de América del Sur, Central y América del Norte poseen muchos de los atributos científicos de alta prioridad, incluidas partes de la zona de subducción chilena, Ecuador, México, Cascadia y partes de la zona de subducción de Alaska/Aleutianas. Otros centros que obtienen una puntuación alta en esta selección son partes de las zonas de subducción de Japón y Sumatra. Teniendo en cuenta esta selección, las consideraciones logísticas y las necesidades de otras partes de SZ4D, proponemos que la cartera ideal incluya a **Chile, Cascadia y Alaska**. Todos los sitios son capaces de producir grandes terremotos y exhibir regiones de fuerte acoplamiento. Estos sitios muestran diferencias y similitudes en el comportamiento



**Figura FEC-12.** Diagrama de cableado que muestra la relevancia de los criterios de la zona de subducción para cada pregunta científica. Las líneas gruesas y sólidas indican que el criterio es necesario para abordar la pregunta. Las finas líneas discontinuas indican que el criterio es deseable, pero no es necesario para abordar la pregunta.

y parámetros de control hipotéticos (p. ej., estructura térmica, entradas de subducción) y etapa en el ciclo sísmico, lo que permite comparaciones que son importantes para abordar las preguntas científicas y que nos permitirán comprender mejor los peligros en todos los sitios. Existen observaciones y conocimientos fundacionales en todos los centros que SZ4D puede aprovechar. Por último, esta combinación de centros permite excelentes asociaciones nacionales e internacionales.

El mayor riesgo en los Estados Unidos de terremotos de subducción es Cascadia; sin embargo, esa zona de subducción plantea desafíos fundamentales para la observación geofísica. La convergencia lenta y la baja tasa de terremotos limitan las oportunidades de aprender de los eventos antes de que se produzca un suceso catastrófico. Es probable que un esfuerzo centrado en Cascadia no capte ningún terremoto importante o, incluso peor, capte el terremoto devastador previsto sin tener la oportunidad de utilizar cualquier información nueva de SZ4D de antemano. Una zona de subducción más rápida, pero de otro modo análoga, proporciona una probabilidad mucho mayor de aprender y desarrollar nuestra base de conocimientos para que podamos abordar de forma útil el problema de Cascadia.

Tanto Chile como Alaska son análogos útiles para Cascadia; sin embargo, los desafíos logísticos de la tierra limitada, los mares agitados y el clima extremo de Alaska también afectan a la infraestructura que se requeriría para MegaArray. Por lo tanto, recomendamos enfocar MegaArray en Chile. Las observaciones geofísicas dirigidas deben recopilarse a lo largo de las zonas de subducción de Cascadia y Alaska para cubrir las brechas de conocimiento y permitir comparaciones; un ejemplo posible es la geodesia del fondo marino en Cascadia y Alaska. Se espera que los análisis de los datos existentes, los estudios de campo de la deformación activa y el modelado numérico se distribuyan de forma más uniforme entre estos tres centros. Los estudios analógicos requerirán una mayor propagación geográfica.

Para comprender los procesos que controlan el comportamiento de deslizamiento de fallas de la zona de subducción, también necesitamos estudios geológicos y experimentales. Por lo tanto, el componente geológico de FEC también requiere carteras de múltiples sitios de geología activos y analógicos. Los estudios geológicos de las zonas de subducción activa son necesarios para limitar la deformación en los plazos geológicos y la deformación moderna en las fallas de la placa superior y se coordinarán con los lugares de despliegue del instrumento para FEC y L&S. Se requerirá el estudio de sitios analógicos exhumados en tierra para definir las estructuras, composiciones rocosas y condiciones físicas a profundidad que controlen las variaciones en el comportamiento de acoplamiento y deslizamiento en el espacio y el tiempo (p. ej., **Figura FEC-11**). Un inventario preliminar **de posibles sitios de campo analógicos y sus características** proporciona un punto de partida útil para evaluar las posibilidades geológicas. La fase 1 se basará en este trabajo para desarrollar una breve lista de posibles sitios analógicos.

La selección final de las áreas de estudio y el equilibrio de las actividades y la infraestructura entre ellas tendrán en cuenta las necesidades superpuestas de los otros grupos de trabajo de SZ4D, las consideraciones logísticas y las prioridades de los socios nacionales e internacionales y las partes interesadas locales, tal como se analiza en la sección geografía de este plan (**Capítulo 5.1**).

## RESUMEN Y PERSPECTIVA

Un gran desafío desde hace mucho tiempo en las ciencias de la Tierra es comprender cuándo y dónde se producen grandes terremotos. Hemos identificado cuatro subpreguntas en las que la comunidad científica está preparada para realizar nuevos avances importantes debido a los recientes avances en la comprensión, la disponibilidad de nuevos instrumentos y los avances en las capacidades computacionales. Abordar estas preguntas y el gran desafío más amplio de los controles en grandes

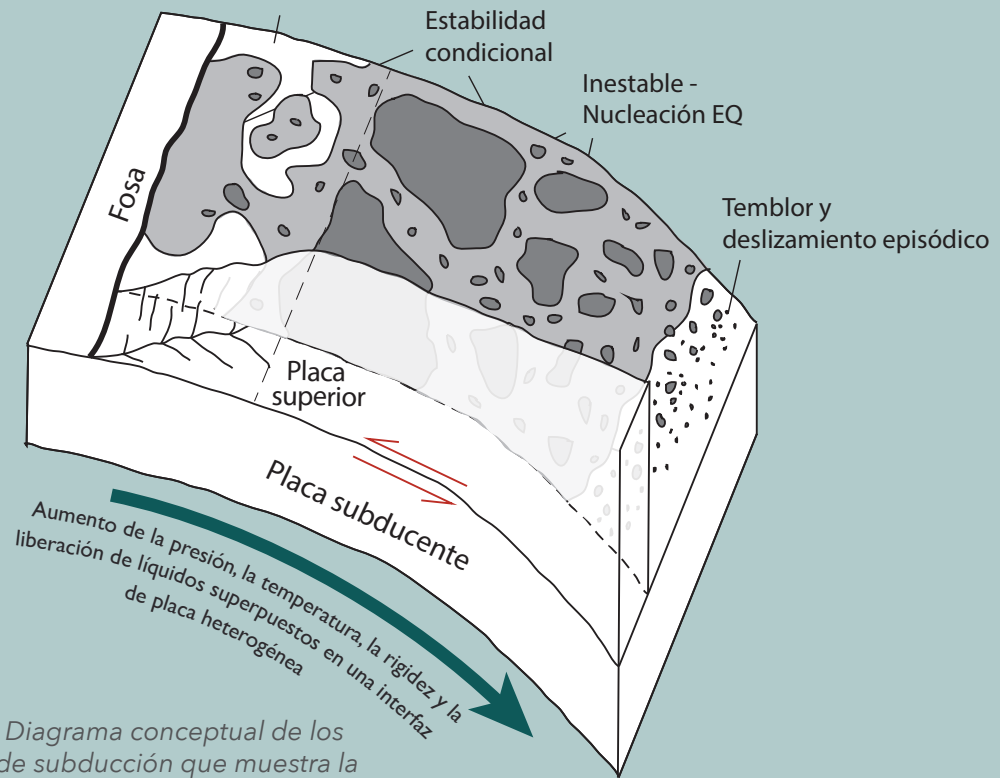
terremotos requiere la recopilación de datos de alta resolución. Estos datos proporcionarán nuevas restricciones en el comportamiento de fallas de la zona de subducción. Los estudios geológicos, experimentales y geofísicos detallados permitirán la caracterización de las propiedades y la arquitectura de la zona de fallas. La medición y el modelado de las propiedades y procesos de la zona de fallas conducirán a una mejor comprensión del comportamiento de la zona de fallas y la contextualizarán, como se detalla en las matrices de trazabilidad de FEC. Se necesita un esfuerzo comunitario coordinado y centrado que implique componentes de observación, experimentales y de modelado ambiciosos y coordinados, tanto dentro de la parte FEC de SZ4D como con otras partes de SZ4D. Para tener éxito, este esfuerzo de colaboración profundo y a largo plazo requiere que las actividades se intercalen y se pongan en fases, como se describe en el plan científico teórico de FEC. El componente de FEC de SZ4D también tiene necesidades importantes en las instalaciones; la infraestructura física técnicamente compleja de los componentes geofísicos y de laboratorio requiere asistencia profesional. La necesidad de una integración estrecha y una infraestructura de observación significativa respalda un enfoque geográfico en un pequeño número de zonas de subducción activas. Somos optimistas en cuanto

a que la estrategia descrita aquí proporcionará nuevos conocimientos fundamentales sobre los procesos de deformación de la zona de subducción y sobre los peligros resultantes.

Alcanzar los objetivos establecidos por el componente de FEC de SZ4D no solo proporcionará nuevos conocimientos de los procesos fundamentales que controlan cuándo y dónde se producen grandes terremotos dañinos, sino que también dará lugar a mejoras tangibles en nuestra capacidad para mitigar los riesgos que plantean los peligros de terremotos y tsunamis. Responder a las cuatro preguntas científicas sobre la conducción proporcionará modelos basados en la física mejorados para los peligros de terremotos y tsunamis en todas las partes del sistema de fallas de subducción que permitirán la evaluación regional y la planificación de peligros, así como una mejor capacidad para supervisar, interpretar y responder a los precursores de grandes terremotos en tiempo real. Aunque el alcance de SZ4D requiere un enfoque geográfico, a través de un estudio integral e integrador, FEC proporcionará una comprensión fundamental y el desarrollo de nuevos modelos conceptuales y físicos de peligros de terremotos que se pueden emplear en otras regiones para mejorar la mitigación de peligros.

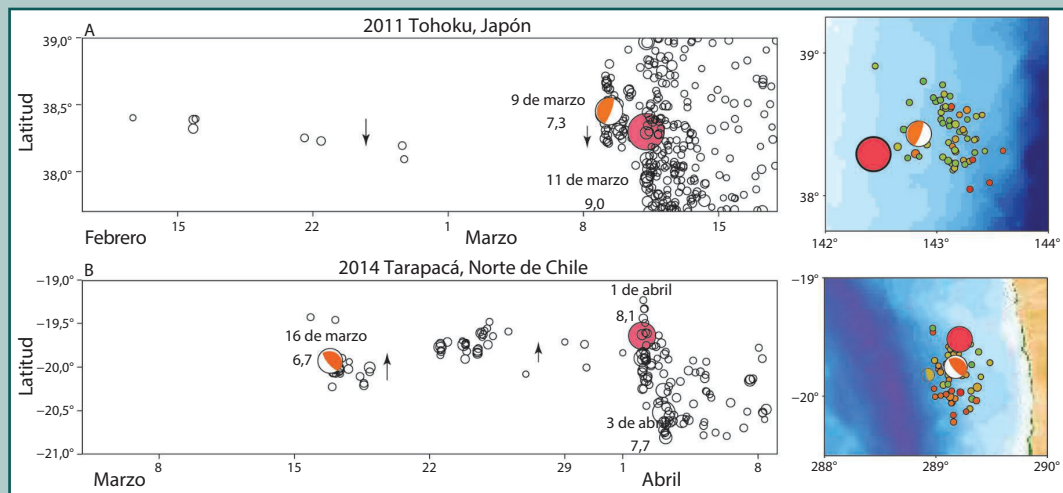
### BARRA LATERAL 2

#### *Una vista moderna de los terremotos en la zona de subducción*



**Figura S2-1.** Diagrama conceptual de los Megathrust de subducción que muestra la heterogeneidad espacial en las propiedades hipotéticas para sustentar el espectro diverso de modos de deslizamiento observados. Después de Li et al. (2015) y Lay et al., (2012).

Durante las últimas 2.5 décadas, la llegada y el despliegue de redes de instrumentos modernos ha provocado una revolución en nuestra visión de los terremotos de zonas de subducción. Esta vista ha evolucionado lejos de modelos simplificados en los que una "zona sismogénica" que bloquea interseísmicamente y alberga grandes terremotos está restringida a una banda de profundidad específica, y está limitada por regiones donde los Megathrust se deslizan a través del arrastre continuo. En su lugar, vemos una imagen mucho más complicada y heterogénea (**Figura S2-1**). Un conjunto de observaciones de rápido crecimiento ha revelado un espectro de comportamiento de deslizamiento en Megathrust de subducción en todo el mundo, que abarca escalas de tiempo de segundos a años. Estos modos de deslizamiento incluyen terremotos regulares (rápidos); terremotos de tsunami y terremotos de baja frecuencia y muy baja frecuencia caracterizados por una mayor abundancia de energía de baja frecuencia en ondas sísmicas radiadas que para terremotos típicos; eventos de deslizamiento lento, en los que el movimiento de fallas transientes ocurre durante semanas a meses; y arrastre asísmico continuo. Estos diversos comportamientos de deslizamiento son en algunos casos irregulares, se superponen en su extensión espacial y no se limitan a condiciones específicas de profundidad, temperatura o presión.



**Figura S2-2.** Evolución espaciotemporal de la sismicidad que condujo a los terremotos de M9.0 de Tohoku de 2011 (arriba) y M8.1 de Tarapacá de 2014 (abajo) (reproducidos de Brodsky y Lay, 2014), lo que muestra la migración y coalescencia de los sismos precursores que condujeron a los sismos principales de estos grandes terremotos.

El reconocimiento de estos diversos comportamientos de deslizamiento ha desencadenado una revolución en la sismología, geodesia y rocas de laboratorio/mecánica de fallas, abriendo nuevas ventanas para comprender las propiedades [¿reología?] de la interfaz de subducción; la interacción de fluidos, geología y metamorfismo; y la física y la escala de los terremotos. Además, las observaciones modernas de la migración y coalescencia de los sismos precursores muestran que, al menos durante algunos eventos grandes, puede producirse una fase preparatoria y ser detectable con una red lo suficientemente densa (**Figura S2-2**). Estas observaciones emergentes también destacan las interacciones potencialmente importantes de los parches de fallas, incluidos los fenómenos desencadenantes y precursores.

### REFERENCIAS

- Agard, P., Plunder, A., Angiboust, S., Bonnet, G., & Ruh, J. (2018). The subduction plate interface: rock record and mechanical coupling (from long to short timescales). *Lithos*, 320, 537–566. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.09.029>
- Barbot, S. (2020). Frictional and structural controls of seismic super-cycles at the Japan trench. *Earth, Planets and Space*, 72(1), 63 <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01185-3>
- Barnes, P. M., Wallace, L. M., Saffer, D. M., Bell, R. E., Underwood, M. B., Fagereng, A., Meneghini, F., et al. (2020). Slow slip source characterized by lithological and geometrical heterogeneity. *Science Advances*, 6, 13 <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay3314>
- Bartlow, N. M. (2020). A long-term view of episodic tremor and slip in Cascadia. *Geophysical Research Letters*, 47(3), e2019GL085303. <https://doi.org/10.1029/2019GL085303>
- Bartlow, N. M., Wallace, L. M., Beavan, R. J., Bannister, S., and Segall, P. (2014). Time-dependent modeling of slow slip events and associated seismicity and tremor at the Hikurangi subduction zone, New Zealand. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119, 734–753. <https://doi.org/10.1002/2013JB010609>
- Behr, W. M., & Bürgmann, R. (2021). What's down there? The structures, materials and environment of deep-seated slow slip and tremor. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 379(2193), 20200218 <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0218>
- Bolton, D. C., Shokouhi, P., Rouet-Leduc, B., Hulbert, C., Rivière, J., Marone, C., & Johnson, P. A. (2019). Characterizing acoustic signals and searching for precursors during the laboratory seismic cycle using unsupervised machine learning. *Seismological Research Letters*, 90(3), 1088–1098. <https://doi.org/10.1785/0220180367>
- Bonini, M. (2019). Seismic loading of fault-controlled fluid seepage systems by great subduction zone earthquakes. *Scientific Reports*, 9, 11332 <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47686-4>
- Bouchon, M., Durand, V., Marsan, D., Karabulut, H., & Schmittbuhl, J. (2013). The long precursory phase of most large interplate earthquakes. *Nature Geoscience*, 6, 299–302. <https://doi.org/10.1038/ngeo1770>
- Bouchon, M., Marsan, D., Durand, V., Campillo, M., Perfettini, H., Madariaga, R., & Gardonio, B. (2016). Potential slab deformation and plunge prior to the Tohoku, Iquique and Maule earthquakes. *Nature Geoscience*, 9, 380–383. <https://doi.org/10.1038/ngeo2701>
- Brodsky, E. E., & Lay, T. (2014). Recognizing foreshocks from the 1 April 2014 Chile earthquake. *Science*, 344, 700–702. <https://doi.org/10.1126/science.1255202>
- Bürgmann, R. (2018). The geophysics, geology and mechanics of slow fault slip. *Earth and Planetary Science Letters*, 495, 112–134. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.04.062>
- Cabrera, L., Poli, P., & Frank, W. B. (2022). Tracking the spatio-temporal evolution of foreshocks preceding the Mw 6.1 2009 L'Aquila earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(3), e2021JB023888. <https://doi.org/10.1029/2021JB023888>
- Cicerone, R. D., Ebel, J. E., & Britton, J. (2009). A systematic compilation of earthquake precursors. *Tectonophysics*, 476(3–4), 371–396. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.06.008>
- Clark, K., Howarth, J., Litchfield, N., Cochran, U., Turnbull, J., Dowling, L., Howell, A., Berryman, K., & Wolfe, F. (2019). Geological evidence for past large earthquakes and tsunamis along the Hikurangi subduction margin, New Zealand. *Marine Geology*, 412, 139–172. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2019.03.004>
- Coffey, G. L., Savage, H. M., Polissar, P. J., Meneghini, F., Ikari, M. J., Fagereng, Å., Morgan, J. K., et al. (2021). Evidence of seismic slip on a large splay fault in the Hikurangi subduction zone. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(8), e2021GC009638. <https://doi.org/10.1029/2021GC009638>
- Colella, H. V., Sit, S. M., Brudzinski, M., Graham, S. E., DeMets, C., Holtkamp, S. G., Skoumal, R. J., Ghouse, N., Cabral-Cano, E., Kostoglodov, V., and Arciniega-Ceballos, A. (2017). Seismicity rate increases associated with slow slip episodes prior to the 2012 Mw 7.4 Ometepec earthquake. *Earth and Planetary Science Letters*, 464, p. 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.12.032>
- Cummins, P. R., & Kaneda, Y. (2000). Possible splay fault slip during the 1946 Nankai earthquake. *Geophysical Research Letters*, 27, 2725–2728. <https://doi.org/10.1029/1999GL011139>

- den Hartog, S.A.M. & Spiers, C. J. (2013). Influence of subduction zone conditions and gouge composition on frictional slip stability of megathrust faults. *Tectonophysics*, 600, 75–90. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.11.006>
- Dmowska, R., Rice, J. R., Lovison, L. C. & Josell, D. (1988). Stress transfer and seismic phenomena in coupled subduction zones during the earthquake cycle. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 93, 7869–7884. <https://doi.org/10.1029/JB093iB07p07869>
- Dragert G., Wang K., James T. S. (2001), A silent slip event on the deeper Cascadia subduction interface. *Science*, 292 (5521). <https://doi.org/10.1126/science.10601>
- Du, Y., Ma, S., Kubota, T., & Sato, T. (2021). Impulsive tsunami and large runup along the Sanriku Coast of Japan produced by an inelastic wedge deformation model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, e2121JB022098. <https://doi.org/10.1029/2021JB022098>
- Duboeuf, L., De Barros, L., Cappa, F., Guglielmi, Y., Deschamps, A., & Seguy, S. (2017). Aseismic motions drive a sparse seismicity during fluid injections into a fractured zone in a carbonate reservoir. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(10), 8285–8304. <https://doi.org/10.1002/2017JB014535>
- Dunham, E. M., Thomas, A. M., Becker, T. W., Cattania, C., Hawthorne, J., Hubbard, J., Lotto, et al. (2020). *Megathrust Modeling Workshop Report*. Modeling Collaboratory for Subduction RCN.
- Fagereng, A., & Sibson, R. H. (2010). Melange rheology and seismic style. *Geology*, 38, 751–754. <https://doi.org/10.1130/G30868.1>
- Fan, W., Bassett, D., Jiang, J., Shearer, P. M., & Ji, C. (2017). Rupture evolution of the 2006 Java tsunami earthquake and the possible role of splay faults. *Tectonophysics*, 721, 143–150. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.10.003>
- Flidner, C., & French, M. E. (2021). Pore and mineral fabrics control the elastic wave velocities of metapelite with implications for subduction zone tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(10), e2021JB022361. <https://doi.org/10.1029/2021JB022361>
- Frank, W. B. (2016). Slow slip hidden in the noise: The intermittence of tectonic release. *Geophysical Research Letters*, 43(19), 10–125. <https://doi.org/10.1002/2016GL069537>
- Fujiwara, T., Kodaira, S., No, T., Kaiho, Y., Takahashi, N., & Kaneda, Y. (2011). The 2011 Tohoku-Oki earthquake: Displacement reaching the trench axis. *Science*, 334, 1240–1240. <https://doi.org/10.1126/science.1211554>
- Gomberg, J., & Sherrod, B. (2014). Crustal earthquakes triggering by modern great earthquakes on subduction zone thrusts. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(2):1235–1250. <https://doi.org/10.1002/2012JB009826>
- Gosselin, J. M., Audet, P., Esteve, C., McLennan, M., Mosher, S. G., & Schaeffer, A.J. (2020). Seismic evidence for megathrust fault-valve behavior during episodic tremor and slip. *Science Advances*, 6(4). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay5174>
- Hardebeck, J. L., Felzer, K. R., & Michael, A. J. (2008). Improved tests reveal that the accelerating moment release hypothesis is statistically insignificant. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B8), <https://doi.org/10.1029/2007JB005410>
- Hawkes, A. D., Scott, D. B., Lipps, J. H., & Combellick, R. (2005). Evidence for possible precursor events of megathrust earthquakes on the west coast of North America. *Geological Society of America Bulletin*, 117(7–8), 996–1008. <https://doi.org/10.1130/B25455.1>
- Hawthorne, J. C., & Rubin, A. M. (2013). Laterally propagating slow slip events in a rate and state friction model with a velocity-weakening to velocity-strengthening transition. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(7), 3785–3808. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50261>
- Hollingsworth, J., Ye, L., & Avouac, J.-P. (2017). Dynamically triggered slip on a splay fault in the Mw7.8, 2016 Kaikoura (New Zealand) earthquake. *Geophysical Research Letters*, 44, 3517–3525. <https://doi.org/10.1002/2016GL072228>
- Hooker, J. N., & Fisher, D. M. (2021). How cementation and fluid flow influence slip behavior at the subduction interface. *Geology*, 49, 1074–1078. <https://doi.org/10.1130/G48741.1>
- Ito, Y., Hino, R., Kido, M., Fujimoto, H., Osada, Y., Inazu, D., Ohta, Y., et al. (2013). Episodic slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Tectonophysics*, 600, 14–26. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.08.022>

- Kanamori, H. (1972). Mechanism of tsunami earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 6(5), 346–359. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(72\)90058-1](https://doi.org/10.1016/0031-9201(72)90058-1)
- Kato, A., & Ben-Zion, Y. (2020). The generation of large earthquakes. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2, 26–39. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00108-w>
- Kato, A., Obara, K., Igarashi, T., Tsuruoka, H., Nakagawa, S., & Hirata, N. (2012). Propagation of slow slip leading up to the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake. *Science*, 335(6069), 705–708. <https://doi.org/10.1126/science.1215141>
- Kim, Y., Abers, G. A., Li, J., Christensen, D., Calkins, J., & Rondenay, S. (2014). Alaska Megathrust 2: Imaging the megathrust zone and Yakutat/Pacific plate interface in the Alaska subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119, 1924–1941. <https://doi.org/10.1002/2013JB010581>
- Kirkpatrick, J. D., Fagerang, Å., & Shelly, D. R. (2021). Geological constraints on the mechanisms of slow earthquakes. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2, 285–301. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00148-w>
- Kitajima, K., & Saffer, D. M. (2012). Elevated pore pressure and anomalously low stress in regions of low frequency earthquakes along the Nankai Trough subduction megathrust. *Geophysical Research Letters*, 39(23), <https://doi.org/10.1029/2012GL053793>
- Kodaira, S., Fujiwara, T., Fujie, G., Nakamura, Y. & Kanamatsu, T. (2020). Large coseismic slip to the trench during the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 48, 321–343. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-071719-055216>
- Lamb, S., & Davis, P. (2003). Cenozoic climate change as a possible cause for the rise of the Andes. *Nature*, 425, 792–792. <https://doi.org/10.1038/nature02049>
- Lay, T., Ammon, C. J., Kanamori, H., Kim, M. J., & Xue, L. (2011). Outer trench-slope faulting and the 2011 Mw9.0 off the Pacific coast of the Tohoku earthquake. *Earth, Planets and Space*, 63, 37, <https://doi.org/10.5047/eps.2011.05.006>
- Lay, T., Kanamori, H., Ammon, C. J., Koper, K. D., Hutko, A. R., Ye, L. Yue, H. et al. (2012). Depth-varying rupture properties of subduction zone megathrust faults. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B4). <https://doi.org/10.1029/2011JB009133>
- Leithold, E. L., Wegmann, K. W., Bohnenstiehl, D. R., Smith, S. G., Noren, A., & O’Grady, R. (2017). Slope failures within and upstream of Lake Quinault, Washington, as uneven responses to Holocene earthquakes along the Cascadia subduction zone. *Quaternary Research*, 89, 178–200. <https://doi.org/10.1017/qua.2017.96>
- Li, J., Shillington, D. J., Bécel, A., Nedimović, M. R., Webb, S. C., Saffer, D. M., Keranen, K. M., et al. (2015). Downdip variations in seismic reflection character: Implications for fault structure and seismogenic behavior in the Alaska subduction zone. *Journal of Geophysical Research*, 120(11), 7883–7904. <https://doi.org/10.1002/2015JB012338>
- Linde, A., & Sacks, I. (1998). Triggering of volcanic eruptions. *Nature*, 395, 888–890. <https://doi.org/10.1038/27650>
- Liu, Y., & Rice, J. R. (2007). Spontaneous and triggered aseismic deformation transients in a subduction fault model. *Journal of Geophysical Research*, 112(B9). <https://doi.org/10.1029/2007JB004930>
- Lotto, G. C., Jeppson, T. N., & Dunham, E. M. (2019). Fully coupled simulations of megathrust earthquakes and tsunamis in the Japan trench, Nankai Trough, and Cascadia Subduction Zone. *Pure and Applied Geophysics*, 176(9), 4009–4041. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1990-y>
- Loveless, J.P., & Meade, B.J. (2010). Geodetic imaging of plate motions, slip rates, and partitioning of deformation in Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B2), <https://doi.org/10.1029/2008JB006248>
- Madden, E. H., Bader, M., Behrens, J., van Dinther, Y., Gabriel, A. A., Rannabauer, L., Ulrich, T., et al. (2021). Linked 3D modeling of megathrust earthquake-tsunami events: From subduction to tsunami run-up. *Geophysical Journal International*, 224(1), 487–516, <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa484>
- Matsuzawa, T., Shibazaki, B., Obara, K., & Hirose, H. (2013). Comprehensive model of short- and long-term slow slip events in the Shikoku region of Japan, incorporating a realistic plate configuration. *Geophysical Research Letters*, 40(19), 5125–5130, <https://doi.org/10.1002/grl.5100>
- McLaskey, G. C. (2019). Earthquake Initiation From Laboratory Observations and Implications for Foreshocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(12), 12882–12904. <https://doi.org/10.1029/2019JB018363>

- Meng, L., Huang, H., Bürgmann, R., Ampuero, J.-P., & Strader, A. (2015). Dual megathrust slip behaviors of the 2014 Iquique Earthquake sequence. *Earth and Planetary Science Letters*, 411, 177–187. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.11.041>
- Meridith, L. N., Screatton, E. J., Jaeger, J. J., James, S. R., & Villasenor, T. (2017). The impact of rapid sediment accumulation on pore pressure development and dehydration reactions during shallow subduction in the Gulf of Alaska. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(1), 189–203. <https://doi.org/10.1002/2016GC006693>
- Mignan, A. (2014). The debate on the prognostic value of earthquake foreshocks: A meta-analysis. *Scientific Reports*, 4, 4099 <https://doi.org/10.1038/srep04099>
- Mogi, K. (1969). Some features of recent seismic activity in and near Japan (2) : Activity before and after great earthquakes. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 47(3), 395–417.
- Naif, G., Key, K., Constable, S., & Evans, R. L. (2016). Porosity and fluid budget of a water-rich megathrust revealed with electromagnetic data at the Middle America Trench. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(11), 4495–4516. <https://doi.org/10.1002/2016GC006556>
- Nakata, R., Hori, T., Hyodo, M., & Ariyoshi, K. (2016). Possible scenarios for occurrence of M ~ 7 interplate earthquakes prior to and following the 2011 Tohoku-Oki earthquake based on numerical simulation. *Scientific Reports*, 6(1), 25704. <https://doi.org/10.1038/srep25704>
- Obana, K., Nakamura, T., Fujie, G., Kodaira, S., Kaiho, Y., Yamamoto, Y., & Miura, S. (2018). Seismicity in the source areas of the 1896 and 1933 Sanriku earthquakes and implications for large near-trench earthquake faults. *Geophysical Journal International*, 212(3) 2061–2072. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx532>
- Obara, K. (2002). Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan. *Science*, 296(5573). <https://doi.org/10.1126/science.1070378>
- Obara, K., & Kato, A. (2016). Connecting slow earthquakes to huge earthquakes. *Science*, 353(6296), 253–257. <https://doi.org/10.1126/science.aaf1512>
- Phillips, N. J., Motohashi, G., Ujiie, K., & Rowe, C. D. (2020). Evidence of localized failure along altered basaltic blocks in tectonic mélangé at the updip limit of the seismogenic zone: Implications for the shallow slow earthquake source. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 21(7), e2019GC008839. <https://doi.org/10.1029/2019GC008839>
- Pritchard, M. E., Allen, R. M., Becker, T. W., Behn, M. D., Brodsky, E. E., Bürgmann, R., Ebinger, C., et al. (2020). New opportunities to study earthquake precursors. *Seismological Research Letters*, 91, 2444–2447. <https://doi.org/10.1785/0220200089>
- Radiguet, M., Perfettini, H., Cotte, N., Gualandi, A., Valette, B., Kostoglodov, V., Lhomme, T., et al. (2016). Triggering of the 2014 Mw7.3 Papanao earthquake by a slow slip event in Guerrero, Mexico. *Nature Geoscience*, 9(11), 829–833. <https://doi.org/10.1038/ngeo2817>
- Roeloffs, E. A. (2006). Evidence for aseismic deformation rate changes prior to earthquakes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35, 591–627. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.34.031405.124947>
- Roland, E., Haeussler, P., Parsons, T., & Hart, P. (2020). Submarine landslide kinematics derived from high-resolution imaging in Port Valdez, Alaska. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(7), e2019JB018007. <https://doi.org/10.1029/2019JB018007>
- Rowe, C. D., Moore, J. C., Remitti, F., & IODP Expedition 343/343T Scientists. (2013). The thickness of subduction plate boundary faults from the seafloor into the seismogenic zone. *Geology*, 41(9), 991–994. <https://doi.org/10.1130/G34556.1>
- Ruiz, S., Metois, M., Fuenzalida, A., Ruiz, J., Leyton, F., Grandin, R., Vigny, et al. (2014). Intense foreshocks and a slow slip event preceded the 2014 Iquique Mw 8.1 earthquake. *Science*, 345(6201), 1165–1169. <https://doi.org/10.1126/science.1256074>
- Saffer, D. M., & Wallace, L. M. (2015). The frictional, hydrologic, metamorphic and thermal habitat of shallow slow earthquakes. *Nature Geoscience*, 8(8), 594–600. <https://doi.org/10.1038/ngeo2490>
- Saito, T. (2019). *Tsunami Generation and Propagation*. Tokyo: Springer.
- Sallares, V., & Ranero, C. R. (2019). Upper-plate rigidity determines depth-varying rupture behaviour of megathrust earthquakes. *Nature*, 576, 96–101. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1784-0>
- Satake, K. (2015). Tsunamis. In G. Schubert (ed.). *Treatise on Geophysics, Second Edition*, (Vol. 4, 477–504), Elsevier.

- Savage, H. M., Keranen, K. M., Schaff, D. P., and Dieck, C. (2017). Possible precursory signals in damage zone foreshocks. *Geophysical Research Letters*, 44(11), 5411–5417. <https://doi.org/10.1002/2017GL073226>
- Schmalzle, G. M., McCarey, R., & Creager, K. C. (2014). Central Cascadia subduction zone creep. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(4), 1515–1532. <https://doi.org/10.1002/2013GC005172>
- Seno, T. (2000). The 21 September, 1999 Chi-Chi Earthquake in Taiwan: Implications for Tsunami Earthquakes. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 11, 701 [https://doi.org/10.3319/TAO.2000.11.3.701\(CCE\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2000.11.3.701(CCE))
- Simon, V., Kraft, T., Diehl, T., & Tormann, T. (2021). Possible precursory slow-slip to two  $M_L \sim 3$  main events of the Diemtigen microearthquake sequence, Switzerland. *Geophysical Research Letters*, 48(19), e2021GL093783. <https://doi.org/10.1029/2021GL093783>
- Skarbek, R. M., Rempel, A. W., & Schmidt, D. A. (2012). Geological heterogeneity can produce aseismic slip transients. *Geophysical Research Letters*, 39(21). <https://doi.org/10.1029/2012GL053762>
- Socquet, A., Valdes, J. P., Jara, J., Cotton, F., Walpersdorf, A., Cotte, N., Specht, S., et al. (2017). An 8 month slow slip event triggers progressive nucleation of the 2014 Chile megathrust. *Geophysical Research Letters*, 44(9), 4046–4053. <https://doi.org/10.1002/2017GL073023>
- Song, T.-R. A., Helmberger, D. V., Brudzinski, M. R., Clayton, R. W., Davis, P., Pérez-Campos, X., & Singh, S. K. (2009). Subducting slab ultra-slow velocity layer coincident with silent earthquakes in southern Mexico. *Science*, 324, 502–506. <https://doi.org/10.1126/science.1167595>
- Sun, T., Saffer, D., & Ellis, S. (2020). Mechanical and hydrological effects of seamount subduction on megathrust stress and slip. *Nature Geoscience*, 13, 249–255. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0542-0>
- Sweet, M. L., & Blum, M. D. (2016). Connections between fluvial to shallow marine environments and submarine canyons: Implications for sediment transfer to deep water. *Journal of Sedimentary Research*, 86(10), 1147–1162. <https://doi.org/10.2110/jsr.2016.64>
- Tanioka, Y., & Satake, K. (1996). Tsunami generation by horizontal displacement of ocean bottom. *Geophysical Research Letters*, 23(8), 861–864. <https://doi.org/10.1029/96GL00736>
- Trugman, D. T., & Ross, Z. E. (2019). Pervasive foreshock activity across southern California. *Geophysical Research Letters*, 46, 8772–8781. <https://doi.org/10.1029/2019GL083725>
- Trütner, S., Hüpers, A., Ikari, M. J., Yamaguchi, A., & Kopf, A.J. (2015). Lithification facilitates frictional instability in argillaceous subduction zone sediments. *Tectonophysics*, 665, 177–185. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.10.004>
- Ujiié, K., Tanaka, H., Saito, T., Tsutsumi, A., Mori, J. J., Kameda, J., Brodsky, E. E., et al. (2013). Low coseismic shear stress on the Tohoku-Oki megathrust determined from laboratory experiments. *Science*, 342, 1211–1214. <https://doi.org/10.1126/science.124348>
- Ulrich, T., Gabriel, A. A., & Madden, E. H. (2022). Stress, rigidity and sediment strength control megathrust earthquake and tsunami dynamics. *Nature Geoscience*, 15(1), 67–73. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00863-5>
- Wallace, L., Kaneko, Y., Hreinsdóttir, S., Hamling, I., Peng, Z., Bartlow, N., D’Anastasio, E., & Fry, B. (2017). Large-scale dynamic triggering of shallow slow slip enhanced by overlying sedimentary wedge. *Nature Geoscience*, 10, 765–770. <https://doi.org/10.1038/ngeo3021>
- Wallace, L. M., Bartlow, N., Elliot, J., & Schwartz, S. (2021). Subduction megathrust locking and slip behavior. *GeoPRISMS Newsletter #43*
- Walton, M. A. L., Staisch, L. M., Dura, T., Pearl, J. K., Sherrod, B., Gomberg, J., Engelhart, S., et al. (2021). Toward an integrative geological and geophysical view of Cascadia subduction zone earthquakes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 49, 367–398. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-071620-065605>
- Wang, K. & Bilek, S.L. (2011). Do subducting seamounts generate or stop large earthquakes? *Geology*, 39, 819–822. <https://doi.org/10.1130/G31856.1>
- Wang, K. L., & Bilek, S. L. (2014). Invited review paper: Fault creep caused by subduction of rough seafloor relief. *Tectonophysics*, 610, 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.11.024>
- Warren-Smith, E., Fry, B., Wallace, L., Chon, E., Henrys, S., Sheehan, A., Mochizuki, K., et al. (2019). Episodic stress and fluid pressure cycling in subducting oceanic crust during slow slip. *Nature Geoscience*, 12, 475–481. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0367-x>

- Watt, J. T., & Brothers, D.S. (2021) Systematic characterization of morphotectonic variability along the Cascadia convergent margin: Implications for shallow megathrust behavior and tsunami hazards. *Geosphere*, 17, 95–117. <https://doi.org/10.1130/GES02178.1>
- Wech, A. G. (2010). Interactive tremor monitoring. *Seismological Research Letters*, 81 (4), 664–669. <https://doi.org/10.1785/gssrl.81.4.664>
- Wells, R.E., Blakely, R.J., Wech, A.G., McCrory, P.A., & Michael, A. (2017). Cascadia subduction tremor muted by crustal faults. *Geology*, 45, 515–518. <https://doi.org/10.1130/G38835.1>
- Wilson, A., & Ma, S. (2021). Wedge plasticity and fully coupled simulations of dynamic rupture and tsunami in the Cascadia subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(7), e2020JB021627. <https://doi.org/10.1029/2020JB021627>
- Wu, C., Meng, X., Peng, Z., & Ben-Zion, Y. (2014). Lack of spatiotemporal localization of foreshocks before the 1999 M w 7.1 Düzce, Turkey, earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(1), 560–566. <https://doi.org/10.1785/0120130140>
- Yamashita, T. & Ohnaka, M. (1992). Precursory surface deformation expected from a strike-slip fault model into which rheological properties of the lithosphere are incorporated. *Tectonophysics*, 211 (1-4), 179-199. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90058-E](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90058-E)
- Yokota, Y., & Ishikawa, T. (2020). Shallow slow slip events along the Nankai Trough detected by GNSS-A. *Science Advances*, 6(3), <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay5786>

# RELIEVES TERRESTRES Y RELIEVES MARINOS

¿CÓMO CONTROLAN LAS ZONAS DE  
SUBDUCCIÓN LOS PELIGROS DE LA SUPERFICIE  
Y LA EVOLUCIÓN DEL PAISAJE?

## MOTIVACIÓN CIENTÍFICA

Los procesos de superficie terrestre y tierra sólida desempeñan un papel central en la conformación de relieves terrestres y relieves marinos de zonas de subducción e impulsan peligros que afectan a la civilización. Las tormentas y los movimientos sísmicos movilizan rocas, sedimentos y tierra, que son transportados continuamente hacia el mar por el flujo de ríos inundantes y corrientes marinas. Los pulsos de erosión catastróficos y puntuados en relieves terrestres y relieves marinos pueden iniciar respuestas y ajustes complicados que persisten durante años o incluso décadas después de los eventos que precipitaron la cascada geomórfica (p. ej., Gran, 2012; Bruni et al., 2021). Las fallas de pendiente resultantes del colapso del sector volcánico, los cambios en el nivel del suelo por terremotos y las tormentas pueden todos los canales del río dique, lo que conduce a ajustes continuos en respuesta a cambios en el suministro de sedimentos o inundaciones repentinas que alteran

rápidamente la morfología del canal fluvial (p. ej., Capra y Macias, 2002), los cuales pueden afectar a las comunidades aguas abajo. El depósito de grandes volúmenes de detritos resultantes de perturbaciones en la zona de subducción puede modificar las redes fluviales durante décadas a años, cambiando tanto sus formas como sus procesos de forma que puedan producir inundaciones más frecuentes y promover la ampliación del canal (p. ej., Major et al., 2016; Korup et al., 2019). Estos peligros geológicos reflejan procesos de tierra sólida a largo plazo que actúan dentro de la zona de subducción (p. ej., Ott et al., 2021). Por ejemplo, la falla y el plegado de la corteza entre la fosa y los sistemas de transporte de sedimentos modificados por arco volcánico (p. ej., Wells et al., 1988), crean una topografía que altera el clima y producen fallas geológicas (p. ej., Bhattacharya et al., 2018). Los procesos volcánicos y magmáticos también crean topografía (p. ej., Karlstrom et al., 2018) e influyen en el estado térmico y mecánico de la corteza (p. ej., Karakas et al., 2017), lo que afecta a los peligros volcánicos a corto plazo.

A pesar de los riesgos sustanciales para los ecosistemas, las comunidades y la infraestructura dentro de los relieves terrestres y relieves marinos de la zona de subducción representados por las perturbaciones de la superficie terrestre y sus impactos en cascada, todavía no podemos determinar cuándo se iniciarán las perturbaciones catastróficas de la superficie, dónde se extenderán los detritos producidos por estos eventos, y cuánto tiempo y hasta dónde se extenderán los impactos en cascada producidos por estas perturbaciones. Del mismo modo, sigue sin estar claro qué controla la cantidad de convergencia de la zona de subducción que se acumula entre la fosa y el arco, lo que determina el potencial de terremotos, tsunamis y remoción en masa desencadenados sísmicamente en áreas a menudo cercanas a áreas pobladas y esculpe la topografía que define los entornos de zona de subducción.

Las tecnologías desarrolladas recientemente y emergentes ahora nos permiten estudiar estos procesos de superficie terrestre y tierra sólida de formas nunca antes posible. Se han realizado avances en la capacidad de observar el inicio, el transporte y el impacto a largo plazo de los eventos de remoción en masa y simular la física de los procesos asociados a la escala de los sistemas de zonas de subducción. Los métodos de obtención de imágenes espaciales de alta resolución ahora nos permiten localizar dónde y cuándo se inician los eventos de remoción en masa y, en algunos casos, caracterizar las tasas de movimiento. El plano suborbital y las plataformas basadas en drones, junto con los desarrollos de visión artificial, permiten la caracterización detallada de los impactos posteriores producidos por las perturbaciones. Recientemente, las tecnologías de drones submarinos y de monitorización continua nos han permitido capturar cambios en el paisaje marino producidos por la degradación de escarpes de fallas submarinas (Hughes et al., 2021) y las corrientes de densidad de sedimentos que pueden iniciarse por los deslizamientos de tierra submarinos generados por terremotos. Del mismo modo, estas tecnologías nos permiten por primera vez obtener una visión detallada y

sinóptica de la forma en que las áreas entre la fosa y el arco volcánico se deforman en cuatro dimensiones, lo que nos permite comenzar a restringir el balance energético total de la zona de subducción. La geodesia satelital de alta precisión, la altimetría láser repetida, las nuevas tecnologías de monitorización y adquisición de imágenes submarinas basadas en drones y las imágenes ópticas y multispectrales de alta resolución ahora pueden cuantificar la deformación y erosión continuas de la Tierra en tiempo casi real. Simultáneamente, los desarrollos en hardware informático ahora proporcionan a los investigadores computación a escala de petaflops, mientras que los desarrollos en métodos numéricos permiten la simulación precisa de la física multifase de los flujos producidos por perturbaciones e impactos en cascada. Estos avances nos permiten utilizar modelos numéricos de última generación que combinan acciones de procesos superficiales y geodinámica de zonas de subducción para vincular las observaciones con la energía y dinámica de los procesos que dan forma a relieves terrestres y relieves marinos de la zona de subducción. Este trabajo es fundamental para comprender los riesgos que suponen los eventos tectónicos peligrosos para las comunidades que ocupan zonas de subducción. A través de una década de esfuerzo, muchos de estos avances permitirán a la comunidad abordar preguntas fundamentales que subyacen a nuestra capacidad de comprender estos eventos peligrosos.

## PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

El componente de L&S de SZ4D ha identificado dos preguntas de investigación e hipótesis relacionadas que aprovechan este conjunto de nuevas tecnologías de observación, capacidades computacionales y desarrollos de modelos. Abordar estas preguntas mejorará el progreso hacia la consecución de los objetivos de los grupos de trabajo de SZ4D, FEC y MDE, y proporcionará un marco para la investigación interdisciplinaria que conducirá a avances transformadores en la ciencia de la zona de subducción.

¿Cómo generan y transportan sedimentos los eventos dentro de la atmósfera, la hidrósfera y la tierra sólida a través de relieves terrestres y relieves marinos de la zona de subducción?

Por ejemplo, ¿cuáles son los controles fundamentales sobre el inicio y la desviación de los deslizamientos de tierra, las corrientes de turbidez, la licuefacción y otros procesos superficiales, incluidos los influenciados por terremotos y eventos volcánicos? ¿Cómo producen los procesos de superficie impactos en cascada y persistentes a medida que el material se transporta por el paisaje y el paisaje marino? ¿Cuáles son las reacciones entre los terremotos de la zona de subducción y las erupciones volcánicas, y la generación y el transporte de sedimentos a través de relieves terrestres y relieves marinos?

¿Qué fracción del balance energético de una zona de subducción se destina a crear y dar forma a la zona de subducción de relieves terrestres y relieves marinos?

Por ejemplo, ¿cuánta deformación permanente se absorbe en la placa superior de la zona de subducción y qué factores controlan esto? ¿Cómo modifican colectivamente la interfaz de subducción, las estructuras de la placa superior y los sistemas magmáticos los sistemas de transporte de sedimentos y responden a los cambios en relieves terrestres y relieves marinos? ¿Cómo contribuye la interacción de los procesos en la zona de subducción al balance energético de deformación que limita la energía potencial que impulsa los deslizamientos de tierra y las condiciones que desencadenan terremotos y erupciones? ¿Cómo afectan los cambios periódicos en el clima al estado de estrés de la corteza?

A partir de estas dos preguntas de investigación, hemos desarrollado **hipótesis comprobables** en sistemas de zonas de subducción. Organizamos estas hipótesis en términos de cada pregunta de investigación:

- Hipótesis comprobables para la **pregunta 1 de investigación** | **Figura LS-1**

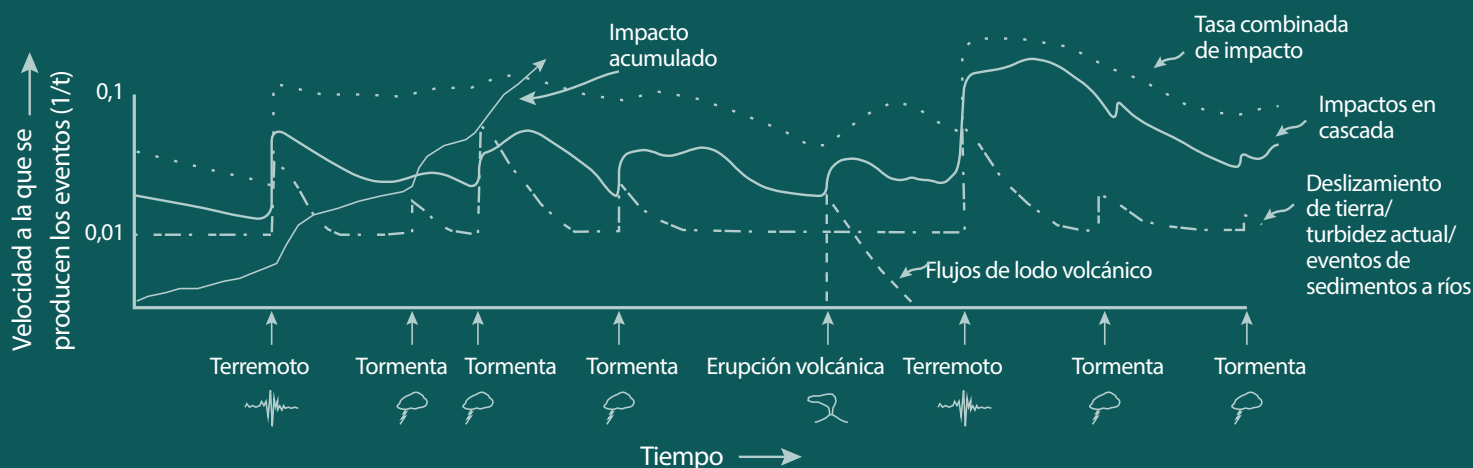
Una amplia hipótesis de trabajo que aborda esta pregunta es que la frecuencia de eventos que inician movimientos de masa y movilizan la generación y el transporte de sedimentos de control de sedimentos. Cuando los sedimentos se generan por fallas de masa en laderas durante tormentas, ríos atmosféricos y eventos de precipitaciones altas con más frecuencia que los eventos de tierra sólida (p. ej., movimientos sísmicos y desequilibrio volcánico), el primero dominará la generación y el transporte de sedimentos (p. ej., como en LaHusen et al., 2020; Major et al., 2021). Por el contrario, los eventos de tierra sólida pueden desempeñar un papel importante en la conformación de relieves cuando estos tipos de grandes tormentas, ríos atmosféricos y eventos de altas precipitaciones son poco frecuentes (p. ej., Bruni et al., 2021). Por lo tanto, la relación del tiempo de recurrencia de los eventos atmosféricos que “impactan en el relieve” y las perturbaciones de tierra sólida que “impactan en el relieve”, determina la impresión que los procesos atmosféricos frente a tierra sólida juegan en la conformación de varias partes de un paisaje de zona de subducción. En el caso de laderas, cuando se producen con frecuencia eventos atmosféricos grandes que generan deslizamientos, sus impactos dominan el transporte de laderas relacionado con el deslizamiento de tierra. Cuando estos eventos ocurren con menos frecuencia, los movimientos sísmicos o la meteorización intensa de las rocas volcánicas pueden desempeñar un papel importante en el inicio de los deslizamientos de tierra. El inicio de las corrientes de densidad por tormentas terrestres frente a fallas marinas masivas generadas sísmicamente varía en todo el sistema tributario submarino, ya que los tiempos de recurrencia relativos de estos eventos generativos varían. En el sistema del cañón principal durante las gradas bajas a nivel del mar, el canal principal puede estar ocupado frecuentemente por flujos hiperpícnicos generados en tierra que encienden corrientes de densidad con suficiente frecuencia para reducir el papel que desempeñan los grandes eventos de agitación en la generación de estos eventos. Por el contrario, los afluentes de cañones dentro de la pendiente continental

reciben pocos flujos de densidad iniciados en tierra, de manera que las fallas de masa producidas sísmicamente dominan la generación actual de densidad. En el caso de los ríos, el papel de los eventos atmosféricos frente a los de tierra sólida en el transporte de sedimentos depende de su tasa relativa de recurrencia. Las inyecciones de gran magnitud de sedimentos en los ríos, por ejemplo, erupciones volcánicas, lahares y deslizamientos de tierra generalizados generados por terremotos, pueden sobrepasar localmente la capacidad de transporte de los ríos, produciendo grandes cambios en la degradación y el depósito dentro del canal. Cuando la generación de sedimentos a partir de laderas es continua, el transporte constante de sedimentos en los ríos provoca pocos cambios apreciables en la morfología del río.

- Hipótesis comprobables para la **Pregunta de investigación 2** | **Figura LS-2**

Una hipótesis de trabajo central es que el estilo de la deformación de la placa superior se regula

mediante movimientos de la placa y acoplamiento a lo largo de los procesos de Megathrust de subducción, deformación elástica e inelástica en la placa superior, fuerzas de cuerpo generadas por topografía y la configuración reológica de la placa superior (p. ej., Béjar-Pizarro et al., 2013; Penserini et al., 2017; Malatesta et al., 2021). Las condiciones de límite tectónico, tales como el vector de movimiento de la placa y la distribución del acoplamiento a lo largo de Megathrust de subducción, que podrían estar relacionadas con cambios reológicos o variaciones espaciales/temporales en las presiones de fluidos basales dentro de Megathrust de antearco y subducción (p. ej., Barnes et al., 2019), limitan las tensiones laterales presentes en las zonas de subducción. Estas tensiones tectónicas pueden conspirar con las tracciones que actúan a lo largo de la base de la corteza, las fuerzas de cuerpo generadas por la topografía que evoluciona en el tiempo y la adición magmática de la corteza, y las cargas superficiales producidas por el hielo, el volcanismo extrusivo y el depósito para dar lugar al estado de estrés dentro de la corteza (p. ej., Willett, 1999; Fuller et al., 2006; Dielforder et



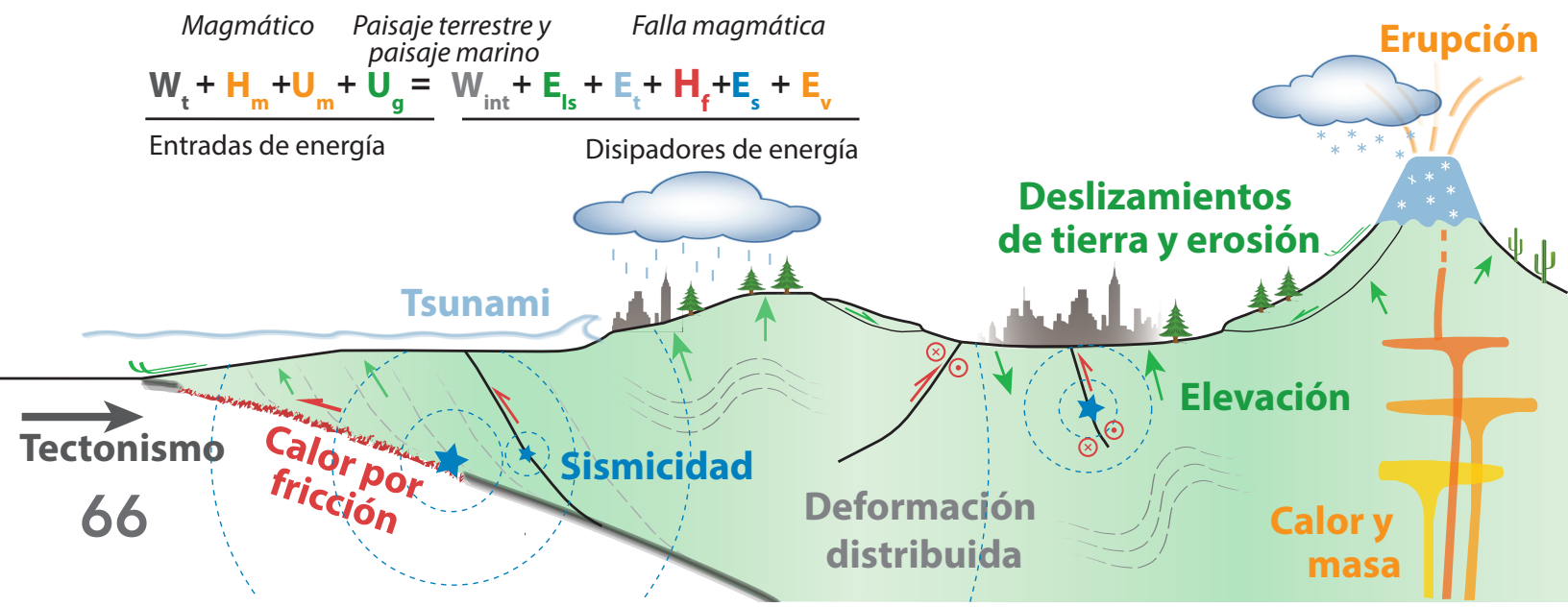
**Figura LS-1.** Representación esquemática de los condicionantes de los peligros de la superficie terrestre en cascada. Los eventos puntuados, como los movimientos sísmicos y las grandes tormentas, pueden aumentar la incidencia de fallas de masa (línea de puntos) durante el evento y a su paso. Del mismo modo, las erupciones volcánicas pueden instigar flujos de lodo (línea discontinua), cuyos impactos persisten mucho después de que se haya producido la erupción. Estos procesos de transporte puntuados introducen grandes entradas de masa a los ríos, cuyas geometrías pueden verse afectadas de forma persistente de una manera que genera peligros como inundaciones durante décadas tras los eventos instigantes (línea sólida). Esta red instrumental de impactos instantáneos y en cascada puede producir repercusiones sustanciales y persistentes a largo plazo que se propagan a través de grandes cuencas hidrográficas, afectando a las comunidades e infraestructuras aguas abajo (línea discontinua).

al., 2020; Wang, 2020). La interacción de este estado de estrés de fondo con las propiedades físicas de la placa superior (tales como debilidades de la corteza debido a los límites del terreno preexistentes y zonas térmicamente debilitadas) puede determinar la naturaleza, el grado y la distribución de la deformación elástica e inelástica en el antearco, y la dinámica de la intrusión y erupción magmática dentro de los sistemas de zonas de subducción (p. ej., Watt et al., 2013; Karlstrom et al., 2017). El estado de estrés informado por las investigaciones energéticas proporciona restricciones críticas sobre las condiciones que inician terremotos (p. ej., Harris et al., 2009), deslizamientos de tierra (p. ej., Martel, 2004) y erupciones volcánicas (p. ej., Gudmundsson, 2012), mientras que el propio balance energético proporciona restricciones sobre la potencia disponible para impulsar estos eventos de peligro (p. ej., Del Castello y Cooke, 2007). Este marco de balance energético proporciona un mecanismo para conectar los procesos de zonas de subducción a largo plazo con los condicionantes de los peligros geológicos a corto plazo.

### TRAZABILIDAD DE LAS PREGUNTAS CIENTÍFICAS A TRAVÉS DE ACTIVIDADES PRÁCTICAS

El grupo de trabajo de L&S definió las prioridades de medición utilizando una matriz de trazabilidad de ciencia y aplicaciones (SATM), presentada en la *Tabla A-LS1*, que relaciona nuestras preguntas de investigación con los observables geofísicos, los requisitos de medición y, en algunos casos, las tecnologías que pueden emplearse para recopilar estas mediciones. La SATM tiene varias deficiencias importantes, que intentamos abordar en este capítulo. En primer lugar, el marco de la SATM es más adecuado para definir los requisitos de medición, pero la ciberinfraestructura y la gestión de datos asociadas con la recopilación y el análisis de datos también son esenciales para el éxito del componente de L&S de SZ4D. Además, la SATM no aborda fácilmente necesidades como el desarrollo de modelos numéricos y los recursos computacionales. Por

**Figura LS-2.** Balance energético esquemático de primer orden de toda la zona de subducción. La ecuación de inserción describe las entradas energéticas ( $W_t$  - trabajo tectónico;  $H_m$  - calor;  $U_m$  - energía potencial gravitacional de entrada/salida de masa del sistema), términos de energía conservadores ( $U_g$  - trabajo de elevación contra gravedad;  $W_{int}$  - trabajo de deformación interna) y disipadores de energía que se pierden en el sistema ( $E_s$  - energía cinética del transporte de sedimentos;  $E_t$  - energía de tsunamis;  $H_f$  - calor friccional de terremotos;  $E_s$  - temblor sísmico y  $E_v$  - calor y energía cinética de erupciones volcánicas). Comprender las relaciones entre los procesos de la zona de subducción puede informar la energía disponible dentro del sistema que puede generar peligros dañinos.



este motivo, complementamos los resultados de nuestro proceso de la SATM con una lista priorizada de estas otras necesidades esenciales para garantizar que la red central de datos proporcionada por la infraestructura de SZ4D se complementa con la ciberinfraestructura, los recursos de desarrollo de modelos y las instalaciones informáticas adecuadas.

Una vez que se recopiló la lista de mediciones requeridas, se asignaron a uno de los tres niveles, definidos y descritos a continuación, de acuerdo con su importancia para abordar nuestras preguntas de investigación. Las mediciones de mayor prioridad cruzaron el mayor número de preguntas científicas clave y tienen el mayor potencial para beneficiar a la mayor franja de ciencias de la superficie y la tierra sólida contenida dentro del componente de L&S del SZ4D. Las mediciones que podrían abordar las necesidades de los otros grupos de trabajo de SZ4D y también involucrar estratégicamente a las agencias en asociaciones de intercambio de datos fueron, en algunos casos, promocionadas en su nivel relativo para facilitar la participación amplia y multiagencia en el esfuerzo de SZ4D. En la siguiente nomenclatura, las mediciones de nivel 1 reflejan las de mayor prioridad, mientras que las mediciones de nivel 3 son mediciones importantes (y en muchos casos necesarias) que no cruzaron un gran número de nuestras preguntas científicas clave. Varios componentes de las mediciones de nivel 1, 2 y 3 comprenden la observación detallada de la superficie terrestre y submarina de la Tierra mediante la adquisición de, por ejemplo, datos batimétricos de alta resolución, imágenes repetidas de radar de apertura óptica y sintética (SAR) basadas en satélites y detección y medición de la luz (LiDAR), monitorización de GNSS y monitorización ambiental a través de redes geofísicas y de sensores. Este conjunto de infraestructuras de inspección, que llamamos SurfArray, supervisará los cambios en la superficie de la Tierra con detalles espaciales y temporales sin precedentes.

### **Prioridades de observación de nivel 1**

Las mediciones de prioridad de nivel 1 cruzan prácticamente todos los aspectos de las

preguntas de investigación de L&S e incluyen la adquisición de imágenes activas de la superficie de tierra sólida, así como los cambios en la superficie con el tiempo. SurfArray es un aspecto fundamental de esta recopilación de datos. En particular, la recopilación de datos completos de topografía y de batimetría de alta resolución espacial (desplazamientos  $< 1$  m) de referencia será esencial para mapear eventos pasados como deslizamientos de tierra, transporte de masa a través de erupciones volcánicas y corrientes de turbidez submarina y lacustre, eventos de inflación y colapso en la cumbre volcánica, rotura de deformación por deslizamiento de fallas cerca de la superficie (deformaciones por terremoto, arrastre constante, y deslizamiento lento y asísmico transiente), erosión y depósito costero, carga y rebote glacial, y cambios geomórficos impulsados antropogénicamente. También necesitamos imágenes repetidas y de alta resolución de la superficie de tierra sólida en áreas donde se han producido eventos para determinar la cantidad de masa movilizada y la respuesta superficial a estos eventos. Es importante destacar que estas capacidades de adquisición deben estar disponibles para su despliegue inmediatamente después de eventos atmosféricos o de tierra sólida para proporcionar restricciones en la respuesta superficial. Además, las plataformas ópticas y de LiDAR basadas en drones son complementos importantes para las imágenes subareales de alta resolución. Estas plataformas generalmente de bajo coste pueden recopilar la topografía a una ultra alta resolución necesaria para la detección de cambios, aunque en áreas de estudio de poca superficie, y se implementan más rápidamente que los activos aéreos más grandes. En segundo lugar, la medición de la deformación de la superficie de tierra sólida es una prioridad alta para el componente de L&S de SZ4D. Las adquisiciones de SAR por satélite de plataformas como la misión NASA-ISRO SAR (INSAR) se pueden utilizar para producir estimaciones interferométricas de topografía y movimiento de superficie, lo que es crucial para restringir la deformación de la superficie debido a deslizamientos de tierra de movimiento lento, arrastre del suelo, acumulaciones de

deformación elástica alrededor de fallas y hundimiento antropogénico debido a la extracción de recursos subterráneos. Este punto central de mediciones por satélite debe complementarse con movimientos de superficie de alta resolución temporal proporcionados por la monitorización continua y de campaña de GNSS. La instalación de monumentos geodésicos marinos es un componente clave de la misión de L&S de limitar las tasas de deformación en la placa superior. Las tasas de deformación derivadas de estas fuentes proporcionan restricciones cruciales en el balance energético en toda la zona de subducción y ayudan a cuantificar las entradas de sedimentos que surgen de movimientos de laderas cuyas tasas se modulan durante temporadas y tormentas individuales.

### Prioridades de observación de nivel 2

El proceso de la SATM identificó cuatro mediciones de nivel 2, todas las cuales son importantes para responder a los componentes de nuestras preguntas clave de investigación. Varios elementos del nivel 2 también son fundamentales para SurfArray, mientras que otros aprovechan y se basan en estos esfuerzos de supervisión a largo plazo. La obtención repetida de imágenes ópticas de alta resolución (píxeles  $<1$  m) por satélite es una medición que cruza muchas de nuestras preguntas, pero cuya utilidad se limita a la superficie. Numerosas (y crecientes) constelaciones de satélites de imágenes ópticas orbitales proporcionan un conjunto de datos emergente que permite observaciones de eventos superficiales a alta resolución espacial (escala métrica) y temporal (diaria). La comparación de imágenes diarias se puede utilizar para realizar un seguimiento de los eventos que generan sedimentos a lo largo de laderas (p. ej., eventos de deslizamiento de tierra) y cómo se ajusta la morfología del canal a medida que las inundaciones transportan sedimentos aguas abajo. La asignación rápida de tareas por satélite puede ayudar a dirigir la respuesta del paisaje posterior al evento.

El seguimiento de sedimentos a través del sistema de transporte requerirá redes de sensores que recojan una serie temporal de descargas al

río y concentraciones de sedimentos. Además, estas redes de sensores terrestres necesitan poder capturar los eventos meteorológicos que inician la cascada de transporte, de modo que estas mediciones espacialmente densas puedan usarse para reducir las observaciones de satélites que capturan áreas amplias a una resolución espacial mucho menor. Estas redes de sensores, cuando se utilizan junto con los sistemas de monitoreo climático basados en satélite existentes, proporcionan la información necesaria para comprender los desencadenantes de las tormentas y las oscilaciones climáticas estacionales que desencadenan la remoción en masa en laderas.

Además de esta red de sensores, se requerirán diversas capacidades geocronológicas para contextualizar las observaciones en tiempo real de eventos de generación de sedimentos individuales y limitar el balance energético de la zona de subducción. Una capacidad mejorada para medir con precisión muestras utilizando nucleidos cosmogénicos nos permite cuantificar rápidamente las tasas de denudación en el momento de la captura a escalas de afloramiento que abarcan desde milenios hasta  $<1$  millón de años. El radiocarbono sigue siendo uno de los métodos de referencia para la datación del Holoceno. Los métodos de luminiscencia estimulada ópticamente y de luminiscencia estimulada por infrarrojos pueden limitar las edades de depósito de decenas a cientos de miles de años. Las tasas de denudación a largo plazo de la corteza terrestre ( $>1$  millón de años) se pueden establecer utilizando un amplio número de técnicas termocronológicas. Juntas, estas mediciones geocronológicas pueden proporcionar información sobre los cambios en la superficie de la zona de subducción, las formas en que las fallas se adaptan a la deformación a largo plazo en la placa superior y el papel que las intrusiones y erupciones pueden desempeñar en la erosión de las áreas montañosas de los sistemas de zona de subducción. Por último, será fundamental realizar un seguimiento del transporte de sedimentos a través de los conductos de transporte submarino y subaéreo. Los instrumentos geofísicos medioambientales

pueden ayudar a cuantificar este transporte porque pueden medir impulsos entregados por masa movilizada durante grandes eventos de deslizamientos de tierra, transporte de sedimentos relacionados con inundaciones o corrientes de densidad marinas energéticas.

### Prioridades de observación de nivel 3

Por último, el componente de L&S de SZ4D identificó una serie de mediciones que son esenciales para responder a aspectos específicos de nuestras preguntas de investigación, pero no se entrecruzan con la mayoría de estas preguntas, y la mayoría de estas necesidades de datos no se incluyen en SurfArray. Algunos ejemplos de estas prioridades son los isótopos estables y la geotermometría de isótopos agrupados que pueden revelar condiciones climáticas pasadas y paleoelevación, la extracción de núcleos de áreas específicas que pueden revelar historias de terremotos locales y la formación de fosas utilizadas para restringir el historial de terremotos a lo largo de fallas particulares. Su calificación como prioridades de nivel 3 no debe confundirse con su importancia para los esfuerzos del componente de L&S de SZ4D. Por el contrario, estos tipos de mediciones deben adaptarse a los detalles de sitios específicos y, por lo tanto, no son adecuados para proporcionar un "centro" de datos para muchos científicos que estudian segmentos de zonas de subducción particulares. En su lugar, estas mediciones necesarias podrían ser facilitadas por una investigación individual impulsada por el PI y respaldada por el mayor esfuerzo de SZ4D.

### La red de sensores ambientales SurfArray (ESN)

La importancia de recopilar mediciones terrestres de información climática, hidrológica y geomorfológica llevó al grupo de L&S a desarrollar y diseñar una red de instrumentación denominada Red de sensores ambientales (ESN) SurfArray, cuyo propósito es supervisar y estudiar el transporte de agua y sedimentos a través de un conjunto de cuencas hidrográficas objetivo. Las mediciones clave incluyen precipitaciones, humedad del suelo, descarga de agua corriente

y sedimentos, y microsismicidad (idealmente medir tres componentes). Afortunadamente, muchas de estas variables y condiciones se pueden medir fácilmente con sensores multi-componente. Cuando se colocan estratégicamente, estos sensores se convierten en una red capaz de proporcionar los datos necesarios para comprender las condiciones ambientales que dan forma al paisaje. La calidad espacial y de sensor prevista de la ESN optimizará el equilibrio entre los costes de la instrumentación y los datos esenciales necesarios para abordar las preguntas de investigación. Prevemos que la ESN funcionará continuamente durante toda la vida útil de SZ4D para capturar los datos necesarios para definir las relaciones frecuencia-magnitud. Esta información mejorará la comprensión de la dinámica meteorológica, hidrológica y de transporte de sedimentos del sistema relevante para aumentar los hallazgos más allá del intervalo de observación. Además de esta red estable y de larga duración, L&S requiere un componente de respuesta más ágil y rápida para el diseño y el despliegue de redes instrumentales, donde la instrumentación y la experiencia se pueden desarrollar rápidamente. Esta red instrumental flexible, de respuesta rápida y a pequeña escala podría adquirir datos de una región de interés dada en las consecuencias inmediatas de un evento que altere el paisaje (p. ej., una gran tormenta o terremoto).

La ESN SurfArray está diseñada para recopilar datos a diversas escalas espaciales. A la mayor escala, se desplegarán sensores para medir la precipitación, la humedad del suelo y la microsismicidad a una distancia de ~100 km basada en la cuadrícula aproximadamente uniforme a la escala de un segmento de zona de subducción (**Figura LS-3A**). La intención principal de este despliegue de sensor grande y espaciado uniformemente es permitir la calibración de productos de datos detectados remotamente relacionados con la precipitación y la humedad del suelo, como el producto de datos de la misión de medición de precipitación global (GPM) de la NASA. Esta red de sensores espaciada toscamente permitirá la calibración regional de mediciones derivadas de satélites,

lo que permitirá una cobertura espacial aún más amplia sobre otros segmentos de zonas de subducción que pueden no contener datos ambientales densos e in situ.

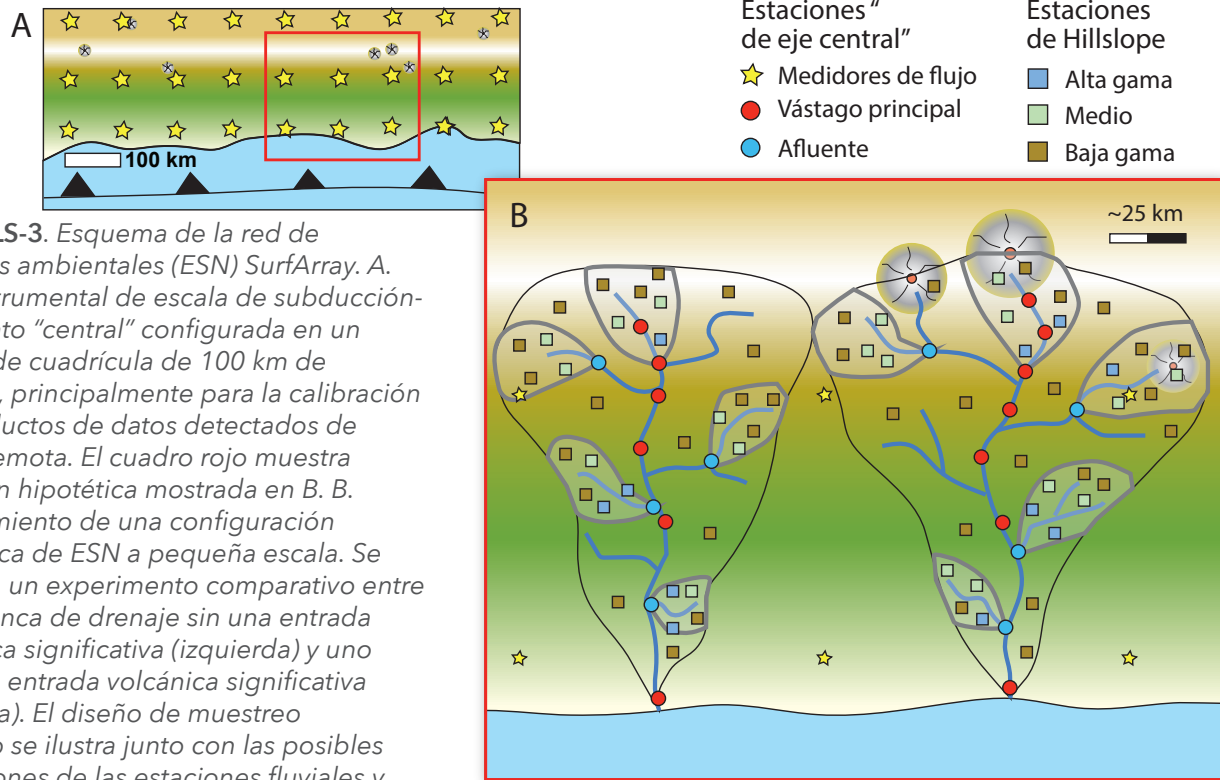
Dentro de este conjunto de sensores espaciados toscamente, también estableceremos una serie de redes de sensores que abarcan la costa hasta el arco volcánico (**Figura LS-3B**). Utilizando un enfoque anidado, en el que se utilizarán estimaciones relativamente aproximadas de la información recopilada sobre grandes áreas para informar de información más detallada a los subdominios que se instrumentan de forma más densa. Específicamente, caracterizaremos exhaustivamente varias cuencas de drenaje grandes cuyos cursos principales drenan aproximadamente paralelos al vector de velocidad de convergencia. Si se instrumentan dos grandes cuencas de drenaje, cada cuenca puede aprovechar otros experimentos comparativos dirigidos por el PI de SZ4D, como el impacto del volcanismo de arco en los procesos geomórficos y los peligros geológicos (**Figura LS-3B**). A la escala de la cuenca de drenaje más grande, desplegaremos una serie de redes de sensores que capturarán una variabilidad a menor escala en la precipitación, la humedad del suelo y la microsismicidad en toda el área del estudio. Prevemos un espaciado entre instrumentos de ~5-50 km, dependiendo del acceso, los permisos, el suministro eléctrico y las carreteras. También planeamos instalar medidores de sedimentos suspendidos y de vertido de agua corriente en el curso principal de la cuenca de drenaje. El espaciado del instrumento será en incrementos de distancia logarítmica o de área de drenaje logarítmico para capturar condiciones que cambian más rápidamente en las nacientes. Dentro de la red instrumental de gran escala de cuencas hidrográficas, los instrumentos estarán más densamente espaciados en drenajes de tercer a primer orden que son aproximadamente perpendiculares a la dirección del flujo del curso principal. Este espaciado capturará idealmente gran parte de la variabilidad tectónica, litológica y meteorológica desde la costa hasta el arco que da como resultado las señales observadas en el sistema fluvial del curso principal. Prevemos

instrumentar de tres a siete cuencas a menor escala en función de la heterogeneidad de la cuenca y las consideraciones logísticas. Dentro de estas pequeñas cuencas, tendremos un sensor de sedimentos suspendidos y de vertido de agua corriente en la salida y de cuatro a diez sensores de precipitación, humedad del suelo y microsismicidad distribuidos por cada cuenca (**Figura LS-3B**).

Prevemos utilizar una gama de sensores de distintos tipos, calidad y costes. L&S necesita sensores de alta calidad que requieran una conexión a la red eléctrica para funcionar. En estos sitios, los sensores de la más alta calidad contendrán múltiples componentes (posiblemente hasta doce). Como referencia para los sitios en laderas, bastarán con medidores de precipitación de bajo coste, sensores de humedad del suelo, sensores de temperatura del suelo e instrumentos microsísmicos (p. ej., Raspberry Shake), pero se prefieren los sismómetros de tres componentes. Es probable que estos sitios se encuentren junto con la instrumentación de MDE y FEC para minimizar los costes y facilitar la logística asociada con el mantenimiento de los instrumentos. Para los sitios fluviales, necesitaremos adquirir instrumentos que midan la descarga del flujo, sedimentos suspendidos, precipitaciones y microsísmos. Estos sitios también pueden estar equipados para medir la química del agua dulce y el transporte de material del lecho a través de placas de impacto o sismómetros de mayor calidad. Prevemos que estos sitios de alta gama están equipados para transmitir datos en tiempo real o procesar primero los datos en el sitio y luego transmitir los datos procesados de forma intermitente. Esta capacidad es fundamental para supervisar el estado de la estación y la calidad de los datos y capturar eventos extremos.

Los sitios de nivel medio no necesitan conectarse a la red eléctrica y podrían alimentarse a través de baterías de alta eficiencia cargadas con paneles solares. Las estaciones de nivel medio tendrán menos sensores que los sitios de alta gama, pero necesitaremos precipitaciones, humedad del suelo y mediciones microsísmicas en sitios de laderas. En los sitios

### Ejemplo de diseño de red de sensores ambientales de SurfArray



fluviales, necesitaremos sensores para recoger las mediciones de precipitación, descarga de corriente, turbidez y microsísmicas. De forma similar a lo anterior, lo ideal sería que los sitios de nivel medio pudieran transferir datos en tiempo real de alguna forma; sin embargo, al reconocer los posibles desafíos, los registradores de datos funcionarán si no hay otras opciones disponibles.

Los sitios de baja gama estarán en laderas solamente y consistirán en medidores de lluvia, sensores de humedad del suelo y microsismómetros de bajo coste. Estos sitios se pueden ejecutar completamente con baterías de alta eficiencia con un software diseñado para mantener la vida útil de la batería durante 6 a 12 meses con una sola carga. Como alternativa, estos sitios se pueden conectar a paneles solares para mantener una mayor vida útil de la batería. Si se colocan en áreas con servicio celular, estos dispositivos pueden transmitir datos a través de Internet de las cosas (IoT) a un coste relativamente bajo. En áreas más remotas sin

señal móvil, es probable que estos sitios de gama baja capturen y almacenen datos en registradores de datos. Además, los sitios de bajo coste podrían distribuirse por las cuencas de drenaje más grandes para proporcionar una cobertura espacial adicional.

### Otras necesidades de infraestructuras

Si bien nuestro proceso de la SATM fue valioso para identificar las prioridades clave de medición de L&S, existen varias necesidades de infraestructura que no entran limpiamente dentro de su categoría. Las tres categorías generales analizadas por nuestro grupo de trabajo incluían la necesidad de una sólida ciberinfraestructura para organizar, distribuir y archivar datos de SurfArray; experimentos y observatorios integrados basados en el campo para manipular/observar sistemáticamente eventos de transporte y coordinar mediciones; y el desarrollo de instalaciones geocronológicas de alto rendimiento capaces de satisfacer las demandas del proyecto de SZ4D de una manera

que mantenga estándares de calidad uniformes. Organizaciones como OpenTopography, Earthdata de la NASA y UNAVCO/IRIS pueden servir como centro para la ciberinfraestructura, pero las fuentes de datos heterogéneas requerirán apoyo para implementarlas. (Estas necesidades comparten afinidad con el grupo de MDE). Los experimentos de campo, tanto terrestres como marinos, podrían imaginarse para observar, y quizás incluso iniciar, eventos de transporte de masa: las mediciones coordinadas dentro de los observatorios de campo utilizarían de la manera más efectiva los recursos para este tipo de esfuerzo. Además, metodologías como Ar-Ar detrítica serían revolucionarias para el seguimiento de la procedencia, pero es posible que deban desarrollarse nuevas instalaciones de geocronología de alto rendimiento para habilitar esta capacidad.

Por último, el modelado numérico debe ser una herramienta central para abordar las hipótesis que surgen de nuestras preguntas clave de investigación. El grupo de L&S identificó cinco necesidades de modelado principales diferentes para investigar las preguntas de investigación enumeradas anteriormente. En primer lugar, la investigación de los condicionantes de peligros geológicos como los deslizamientos de tierra requiere modelos de iniciación de deslizamientos de tierra que puedan aproximarse a la autoorganización y el orden espontáneo para la coalescencia del plano de fallas y la inestabilidad de la pendiente que se basen en la física y puedan reproducir relaciones de magnitud de área, profundidad de área, volumen de área y escalado. Estos modelos deben ser tridimensionales y capaces de manejar geometrías de superficie complejas (es decir, topografía realista) y heterogeneidad interna (p. ej., fracturas y propiedades variables del material como suelos, regolito y rocas). En segundo lugar, la simulación de agua y mezclas sobre la superficie de la Tierra requiere un solucionador de ecuaciones de aguas poco profundas y de alto rendimiento que simule flujos sobre topografía arbitrariamente compleja que abarque desde agua transparente hasta lodos y mezclas de Coulomb de dos componentes que permita el tamizado

cinético de intercambios de fase sólida, agua y sedimentos desde un lecho potencialmente erosionable. En tercer lugar, la simulación de los impactos aguas abajo de las fallas de masa resultantes de eventos atmosféricos o de tierra sólida requiere un solucionador de evolución de lechos y transporte aluvial de código abierto que combine la dinámica del flujo de agua en los ríos con el transporte de sedimentos. Estos códigos deben ser capaces de manejar transiciones entre la superficie húmeda y el perímetro seco y deben acoplar explícitamente la mecánica de transporte de sedimentos a la evolución de los contenedores de los flujos. En cuarto lugar, estos dos conjuntos de códigos deben acoplarse entre sí para simular los peligros en cascada estudiados por SZ4D. Y, por último, para analizar el balance de trabajo y energía de los sistemas de zona de subducción se requiere un proceso de superficie acoplado y modelos tectónicos, geodinámicos y magmáticos. Los esfuerzos existentes (p. ej., Infraestructura Computacional para Geodinámica [CIG] y Sistema de Modelado y Dinámica de Superficie Comunitaria [CSDMS]) y los modelos (p. ej., Landlab) proporcionan vías lógicas hacia adelante. Sin embargo, estos modelos deben ejecutarse a la resolución requerida para capturar la transición de canal en laderas y deben abarcar el transporte a través de toda la zona de subducción, un requisito que podría satisfacerse con una mayor eficiencia del modelo y facilidad de integración del modelo.

Dados los diversos requisitos de modelado de L&S, necesitamos una estructura de financiación que permita el desarrollo sostenido de metodologías que simulen procesos de formación de relieves en la amplia gama de plazos de su operación y que vinculen estos procesos superficiales con la geodinámica de tierra sólida. Por ejemplo, los modelos numéricos de deformación de antearco deben incluir deformación elástica e inelástica en escalas de tiempo cortas y largas, procesos superficiales, discontinuidades de deslizamiento localizadas, estructura térmica de sistemas magmáticos y arquitectura de flujo de fluido del antearco. Actualmente, ningún marco de modelado gestiona bien todos estos procesos. Además de los

recursos humanos necesarios para desarrollar estos modelos acoplados, es necesaria una infraestructura computacional a gran escala para ejecutar modelos a la escala de una zona de subducción. Estas necesidades esenciales pueden satisfacerse mediante la colaboración y el compromiso de aquellos con la experiencia numérica y el acceso a recursos informáticos a gran escala, específicamente el SZ4D-MCS, CSDMS y CIG.

## EXPERIMENTOS TEÓRICOS

El grupo de trabajo de L&S desarrolló un conjunto de experimentos teóricos para probar las hipótesis derivadas de nuestras preguntas de investigación. El diseño de nuestros experimentos teóricos sigue la filosofía de que las pruebas estrictas de modelos conceptuales requieren algún tipo de manipulación experimental en la que las condiciones relevantes se mantienen constantes mientras que un único factor se modifica sistemáticamente. En sistemas naturales de la escala y complejidad de zonas de subducción completas, este tipo de manipulación experimental no es posible, por lo que nuestro enfoque se basa en comparar segmentos de zonas de subducción donde se conocen muchos de los factores relevantes y la comparación cruzada proporciona información sobre los efectos de las variaciones en un solo factor. El diseño experimental emparejado puede usarse para falsificar modelos cuantitativos de transporte geomórfico y deformación de antearco dentro de zonas de subducción, de manera similar a lo que podría ser un experimento estrictamente controlado. Por último, un diseño de segmento de zona de subducción emparejado es útil para identificar las geografías ideales de nuestros experimentos naturales, donde pueden estar presentes variaciones controladas en los factores de interés particulares.

## Experimento teórico 1

Este experimento explora el papel del tiempo de recurrencia de los eventos atmosféricos, magmáticos y de tierra sólida que influyen en el paisaje en los eventos que generan sedimentos y los transportan a depresiones submarinas (**Pregunta de investigación 1**; **Figura LS-1**). Para estos experimentos, lo ideal sería utilizar un conjunto emparejado de segmentos de zona de subducción que tengan condiciones atmosféricas o de tierra sólida similares, mientras que el otro conjunto de factores variaba entre los segmentos de zona de subducción. Por ejemplo, para explorar el impacto de los eventos atmosféricos en la generación de sedimentos, lo ideal sería buscar áreas con una tasa de convergencia constante, ángulo de subducción y relaciones de frecuencia-magnitud para grandes terremotos y eventos magmáticos, mientras que los parámetros climáticos (p. ej., precipitación, frecuencia de tormentas y temperatura) variarían. Las diferencias climáticas podrían alterar supuestamente la distribución de la frecuencia, magnitud y extensión espacial de las tormentas que afectan a los relieves terrestres y relieves marinos de la zona de subducción. En este caso, un experimento satisfactorio requeriría mediciones de campo y datos para capturar el impacto de un solo evento y el efecto integrado de múltiples eventos, así como datos de escala de tiempo más larga que esclarecería cómo estos eventos se acumularon para producir el transporte de masa a largo plazo a través del sistema de zona de subducción. Por ejemplo, las mediciones de precipitación por satélite y por tierra permitirían la determinación de las asociaciones entre las tormentas y los eventos de remoción en masa. La ubicación y las tasas de remoción en masa podrían restringirse mediante observaciones sismológicas, terrestres o de detección remota. La magnitud de la generación de sedimentos podría determinarse entonces reocupando partes del conjunto de datos de alta resolución de referencia, y las mediciones de la carga de sedimentos y las reinspecciones de drones podrían usarse para hacer un seguimiento de cómo se filtra este sedimento aguas abajo y cambia la morfología del valle.

También es importante reconocer que muchos de los factores que nos gustaría mantener constantes en un estudio tan emparejado pueden covariar entre sí debido a los procesos en funcionamiento. Por ejemplo, se ha planteado la hipótesis de que el suministro de sedimentos impulsado por el clima a la fosa influye en el acoplamiento a lo largo de la interfaz de la placa de las zonas de subducción, por lo que, al menos en largos plazos de tiempo, puede ser difícil aislar estos factores. Debido a que los experimentos naturales pueden no permitir el aislamiento perfecto de los factores de control, los estudios paramétricos que utilizan modelos numéricos pueden aumentar el estudio de los sistemas naturales al servir como experimentos imaginarios para interpretar mejor las covariaciones observadas en los sistemas naturales. Necesariamente, estos modelos deben acoplar la deformación de tierra sólida (terremotos y magmática) con los procesos superficiales. Esto permitirá la comparación con los datos de campo que caracterizan los procesos que se producen en un rango igualmente amplio de plazos.

### Experimento teórico 2

Este experimento teórico pretende comprender la interacción entre la topografía en evolución, la deformación y los procesos magmáticos dentro de la placa superior de la zona de subducción. (**Pregunta de investigación 2; Figura LS-2**). Aunque son posibles muchas variaciones para el experimento teórico, dos variantes descritas aquí ofrecen información clave sobre las reacciones entre la zona de subducción y los procesos de superficie terrestre. En una variante, compararíamos segmentos de zona de subducción con grados similares de tasa de acumulación, acoplamiento, flujo magmático y complejidad litotectónica del arco anterior, pero diferentes pendientes de antearco medias, para aislar la interacción entre la carga topográfica y la deformación de la placa superior y el magmatismo. En otra variante, compararíamos zonas de subducción con una profundidad de acoplamiento viscoso similar, pendiente media, tasa de contracción,

tasas de entrada de fusión del manto y flujo de calor, pero diferente complejidad litotectónica y duración de la subducción, para aclarar el papel que desempeña la estructura de la corteza y el historial de subducción producidos por el acoplamiento geológico del antearco y el arco en la deformación de partición y el magmatismo en la placa superior. En ambos casos, la topografía de alta resolución permite la identificación de estructuras activas en el antearco, proporciona un mapa base para las observaciones de campo y detalla la configuración de las cuencas hidrográficas en todo el arco volcánico y el antearco. Las observaciones geológicas, geocronológicas y termocronológicas restringen las tasas de exhumación a largo plazo debido a la acción de las estructuras de antearco y los procesos magmáticos. Por último, los modelos numéricos enmarcados como estudios paramétricos o simulaciones se pueden utilizar para crear predicciones que se pueden incluir o excluir mediante las observaciones de campo.

Estos experimentos teóricos representan estudios aspiracionales abstractos que podrían realizarse idealmente si existieran segmentos de zona de subducción con todas las variaciones dirigidas. Sin embargo, las circunstancias naturales no presentan todas las combinaciones de factores de interés en los experimentos teóricos. Por lo tanto, los posibles conjuntos de experimentos, y las formas específicas que adoptarán, dependen de las características asociadas con conjuntos emparejados de segmentos de zona de subducción particulares. De esta manera, no es posible separar la discusión de nuestros experimentos teóricos de las condiciones naturales disponibles en sistemas de zonas de subducción específicas. La sección sobre la **evaluación del sitio** aporta alguna forma específica a los experimentos teóricos mediante una revisión de las propiedades de los diferentes segmentos de zonas de subducción y una comparación de los pares de segmentos. Ese capítulo busca identificar conjuntos obvios de segmentos de zonas de subducción cuya comparación podría conducir a experimentos naturales razonablemente bien limitados. Sin embargo, la forma general de nuestros experimentos

teóricos tiene como objetivo dejar espacio para la investigación individual impulsada por el PI que podría comparar aspectos particulares de segmentos de zonas de subducción que no se mencionan específicamente en la sección de **evaluación del sitio** como los más susceptibles de abordar nuestras preguntas de investigación a través de una iniciativa comunitaria de una década de duración.

## ACTIVIDADES CIENTÍFICAS INMEDIATAS

Aunque la mayoría de nuestras hipótesis propuestas requieren conjuntos de datos nuevos y de vanguardia, se puede progresar significativamente mediante el análisis de datos e ideas existentes. A continuación, describimos ejemplos de cómo los conjuntos de datos y modelos numéricos existentes pueden hacer avanzar nuestra comprensión de cómo se moviliza y transporta la masa a través de relieves terrestres y relieves marinos, y limitar el balance energético de los sistemas de zonas de subducción. Además, describimos las formas en que estos análisis podrían coordinarse con los experimentos principales de SZ4D.

Los recientes avances en las técnicas de LiDAR aéreas y terrestres, así como en los estudios batimétricos de vehículos subacuáticos autónomos, han proporcionado modelos de elevación digitales de alta resolución que nos permiten explorar la deformación superficial a corto y largo plazo y las perturbaciones en relieves terrestres y relieves marinos (p. ej., Booth et al., 2018; LaHusen et al., 2020; Hilley et al., 2020). Por ejemplo, en Cascadia, donde una parte significativa del paisaje se ha capturado a alta resolución (p. ej., Oregon Department of Geology and Mineral Industries, Puget Sound Lidar Consortium), trabajo reciente para correlacionar la rugosidad de la superficie de deslizamiento de tierra con la edad del evento (p. ej., LaHusen et al., 2016) permitió a los investigadores desarrollar inventarios de deslizamientos de tierra basados en criterios geomórficos y probar el grado en que los cambios climáticos (p. ej., Booth et al., 2018) o

temblores del suelo (p. ej., LaHusen et al., 2020) han contribuido a los cambios en la abundancia de deslizamientos de tierra. Estos archivos a largo plazo de la edad y la distribución de los deslizamientos de tierra son esenciales para comprender cómo la tierra sólida y los eventos atmosféricos movilizan la masa a través de la superficie de la Tierra. Sin embargo, hasta la fecha solo se han caracterizado pequeños segmentos de relieves de zonas de subducción, donde las variaciones en los factores de fuerza pueden ser sutiles. Los sondeos de batimetría y de sedimentos recién recogidos pueden hacer que las técnicas análogas sean aplicables a nivel marino (p. ej., Hill et al., 2020), lo que ayuda a esclarecer el alcance del deslizamiento en las recientes rupturas por Megathrust y a discriminar las turbiditas marinas creadas durante la agitación de otros mecanismos desencadenantes. De forma similar, los nuevos análisis de la morfología de la cuenca de drenaje arrojan luz sobre los vínculos entre el ciclo sísmico de la zona de subducción y el desarrollo de la topografía del antearco (Penserini et al., 2017; Gallen y Wegmann, 2017; Gallen y Fernández-Blanco, 2021), que es directamente aplicable a las pruebas del balance energético de la zona de subducción. Del mismo modo, los nuevos enfoques que relacionan las deformaciones superficiales, la geometría costera y marítima y el acoplamiento interseísmico (p. ej., Saillard et al., 2017) aprovecharían los datos existentes para proporcionar una visión ampliada e integral del balance energético de la zona de subducción.

Además, las técnicas geodésicas modernas como InSAR pueden revelar una deformación superficial a escala de centímetros que puede proporcionar más información sobre la deformación de la corteza durante diferentes fases de ciclos sísmicos, desequilibrio volcánico, deslizamientos de tierra y alteraciones antropogénicas (p. ej., Bürgmann et al., 2000; Avouac, 2015; Shirzaei et al., 2016; Murray y Lohman, 2017; Handwerger et al., 2019). Una visión integral del cambio superficial de alta resolución en un panorama de zona de subducción sigue siendo difícil de alcanzar, pero existen datos para crear un conjunto de

datos comunitarios para supervisar el cambio superficial regional (p. ej., *InSAR Norway*). La geocronología puede proporcionar información sobre las tasas y los patrones de deformación y erosión a largo plazo dentro de los sistemas de subducción. Por ejemplo, la exhumación impulsada por enfriamiento registrada por termocronología se ha utilizado para identificar el momento del inicio de la subducción (p. ej., Thomson et al., 1998; Sutherland et al., 2009; Schoettle-Greene et al., 2020) y eventos geodinámicamente significativos tales como la subducción de montañas submarinas, crestas de extensión o extrusión y migración hacia el océano de una losa (p. ej., Villagómez y Spikings, 2013; Stevens Goddard y Fosdick, 2019). La datación por luminescencia y exposición superficial  $^{10}\text{Be}$  de terrazas y costas marinas con elevación diferencial establece límites en el tiempo y las tasas de elevación de la zona de subducción y tectónica activa dentro de la placa superior (p. ej., Saillard et al., 2011; Gallen et al., 2014; Binnie et al., 2016; Ott et al., 2019a), mientras que las tasas de erosión en toda la captura de radionucleidos cosmogénicos detríticos permiten una estimación de la evolución del paisaje y la respuesta erosional a dicha elevación impulsada por la subducción (p. ej., Olivetti et al., 2012; Ott et al., 2019b). Los datos de geocronología como estos son esenciales para comprender aspectos de todas las hipótesis propuestas para relieves terrestres y relieves marinos de SZ4D, desde observaciones directas de perturbaciones superficiales y flujo de sedimentos hasta condiciones límite que evolucionan con el tiempo para modelos de deformación magmática y tectónica. Sin embargo, en la actualidad, estos datos se limitan generalmente a estudios individuales e investigadores especializados.

En el contexto de la consecución de los objetivos científicos inmediatos de SZ4D, los estudios de modelado sirven para dos fines importantes. En primer lugar, los modelos pueden vincular varios procesos de zonas de subducción entre sí, esclareciendo los comentarios clave que cruzan los tres grupos de trabajo. Por ejemplo, en el caso de estudios situados en sistemas

de extensión, se han utilizado modelos para cuantificar directamente los cambios en la energía que acompañan a la creación y destrucción de la topografía. La redistribución de sedimentos a través de procesos de erosión y de depósito disminuye las fuerzas de cuerpo en algunas regiones (elevación de la superficie) al tiempo que aumenta las cargas en otras (descenso de la superficie) (p. ej., Fuller et al., 2006). Además, los procesos magmáticos de arco crean topografía e impactan en el clima mientras crean cargas impulsivas en la topografía existente (p. ej., Lee et al., 2015). Simultáneamente, el magmatismo modifica la reactividad química de las rocas superficiales, las vías de distribución de sedimentos y la reología de la corteza subyacente. Estos modelos numéricos se han utilizado para vincular observables aparentemente dispares entre sí, como la eficiencia erosional con la localización de la deformación. Por ejemplo, los modelos han demostrado que las condiciones más erosivas localizan la deformación en menos fallas normales de larga duración, mientras que la erosión ineficiente tiende a distribuir la tensión entre muchas fallas con poco desplazamiento (p. ej., Olive et al., 2014). Además, los modelos han asociado la ubicación de las erupciones en las grietas con la creación de la topografía de la fosa tectónica (p. ej., Maccaferri et al., 2014). Se pueden desarrollar fácilmente modelos similares para los sistemas de subducción para obtener información sobre los vínculos entre los procesos de tierra sólida, el clima, la litología de las rocas, la reología litosférica y el magmatismo, todos los cuales son componentes centrales del balance energético de la zona de subducción.

### EVALUACIÓN DEL SITIO

El grupo de trabajo de L&S realizó una evaluación de las características del sitio para identificar aquellas zonas de subducción que ofrecen condiciones para llevar a cabo los experimentos teóricos. Evaluamos los segmentos de la zona de subducción en pasos. En primer lugar, realizamos una revisión exhaustiva de diferentes segmentos de zona de subducción, que se

definieron para lograr dimensiones a lo largo del impacto aproximadamente equivalentes (~200–400 km) donde los parámetros tectónicos, geológicos y climáticos podrían verse como aproximadamente constantes (**Tabla A-LS2**). A continuación, utilizamos un enfoque de “defensoría”, en el que los miembros del grupo de trabajo e interés familiarizados con estas áreas resumieron las propiedades de estos diferentes segmentos de zona de subducción. Es importante destacar que revisamos los aspectos científicos y logísticos al considerar la idoneidad del sitio. En un segundo paso, el grupo de trabajo identificó segmentos que serían problemáticos para el estudio por parte de la comunidad de L&S, ya sea debido a la falta de atributos esenciales o factores logísticos que impedirían el acceso seguro a esas áreas. En un tercer paso, mapeamos nuestros experimentos teóricos en conjuntos de estos segmentos de zona de subducción para determinar aquellas agrupaciones que podrían usarse para realizar experimentos “cuasi controlados” en los que muchas propiedades se consideraron aproximadamente equivalentes, mientras que un número limitado de otras variaron. Este proceso ayudó identificar una serie de combinaciones de segmentos de zona de subducción que parecían cumplir con el diseño de los experimentos teóricos.

El grupo determinó **cuatro características esenciales del sitio** necesarias para llevar a cabo nuestros experimentos teóricos y pruebas de hipótesis.

- **En primer lugar**, al menos una parte del sitio debe incluir la exposición subaerial del antearco (sin hielo).
- **En segundo lugar**, deben existir restricciones de observación o ser aceptables en los sitios adecuados. (Estas observaciones se describen y clasifican en la sección sobre **trazabilidad de las preguntas científicas a través de actividades prácticas**).
- **En tercer lugar**, exigimos que al menos una parte del sitio incluya rocas con minerales susceptibles de geocronología y

termocronología como cuarzo, apatito y circón.

- **En cuarto lugar**, exigimos que el acceso seguro al área del estudio sea al menos posible, y que las particularidades de la divulgación de datos dentro de países individuales no impidan la exportación y publicación abiertas de datos y resultados de investigación.

En nuestro último paso, analizamos los segmentos restantes de la zona de subducción para identificar pares que podrían hacer comparaciones favorables y que nos permitirían llevar a cabo alguna forma de los experimentos teóricos. Aunque no se incluyen en las regiones de interés de SZ4D de Chile, Cascadia y Alaska que se analizan actualmente, observamos algunos de ellos a continuación como emparejamientos con segmentos de estas regiones de interés o de forma independiente, ya que pueden ser viables para experimentos teóricos impulsados por PI a menor escala (p. ej., la zona de subducción de Hikurangi; **Tabla A-LS2**).

**Identificamos varias combinaciones interesantes de la zona de subducción de Cascadia con otros segmentos de la zona de subducción, especialmente Chile.** Cascadia es un margen de acumulación que experimenta grandes rupturas de Megathrust y está situado en un clima templado. La topografía del sistema de zona de subducción se presta a producir orografía significativa, un atributo que era de interés para muchos en el grupo de trabajo. **Una primera comparación ideal con Cascadia podría ser la zona de subducción helénica central**, que muestra tasas similares de convergencia, pero cuyo Megathrust se eleva en gran medida de forma sísmica y cuyo frente se está extendiendo activamente. El caluroso clima mediterráneo de verano y la amplia exposición de los carbonatos contrastan con el clima y los tipos de rocas expuestos en Cascadia. Por lo tanto, aunque sus tasas de convergencia son similares, no lo son el comportamiento de ruptura, el estrés del antearco, el clima y la litología expuesta. Aunque se reconoció que la falta de control sobre muchos factores puede

confundir la aplicación simple del marco experimental teórico, existía la sensación de que dicha comparación podría proporcionar información sobre nuestras preguntas clave de investigación. **Se podría realizar una segunda comparación ideal con Cascadia con el segmento Maule-Valdivia de la zona de subducción andina.** Aquí, los dos segmentos comparten muchas características similares, incluyendo el clima, la fisiografía del arco, la generación de grandes terremotos de la zona de subducción, el grado de acoplamiento del Megathrust de subducción y, en algunas áreas, la presencia de una losa oceánica joven descendente. Sin embargo, la tasa de convergencia a lo largo del segmento Maule-Valdivia es mucho mayor que la zona de subducción Cascadia, lo que nos permite variar sistemáticamente el tiempo de impacto en la tierra sólida frente a los procesos atmosféricos (**Pregunta de investigación 1**) comparando estos dos segmentos. Además, la tasa de energía añadida a la placa superior debido al acoplamiento por fricción a lo largo del Megathrust es probablemente mayor en el segmento Maule-Valdivia, que proporciona una manipulación sistemática de las entradas de energía en el sistema de zona de subducción entre estos dos casos (**Pregunta de investigación 2**). **La zona de subducción helénica central** muestra tasas de convergencia similares a las de Cascadia, pero difiere en su comportamiento de ruptura (su Megathrust se arrastra en gran medida de forma asísmica), el estrés del antearco (está extendiéndose activamente), el clima (mediterráneo caliente) y la litología expuesta (carbonato). Aunque estas diferencias pueden confundir la aplicación simple del marco experimental teórico, existía la sensación de que dicha comparación podría proporcionar información sobre aspectos de nuestras preguntas clave de investigación.

**Otro par de segmentos de zona de subducción que podrían compararse incluye la zona de subducción de Alaska (continental) y los Andes Australes.** Ambos segmentos están ubicados en áreas de gran latitud, donde la erosión glacial es una característica central del paisaje. Ambos tienen un componente de movimiento paralelo

de fosa, que divide la deformación de la placa superior. Sin embargo, las tasas de convergencia a lo largo del segmento de la zona de subducción de Alaska son mucho mayores que las de los Andes Australes, lo que permite una variación sistemática de la tasa de convergencia, que afecta a los procesos paisajísticos (**Pregunta de investigación 1**) y al balance energético del sistema de zona de subducción (**Pregunta de investigación 2**). Puede haber utilidad adicional en el sistema de zona de subducción de Alaska en esta comparación, ya que las diferencias sistemáticas a lo largo del rumbo en la naturaleza del material subducido varían a lo largo del rumbo, lo que podría alterar las tracciones normales que actúan a lo largo de la base de la placa superior debido a las diferencias en la flotabilidad del material de subducción. Los desafíos logísticos en ambos segmentos incluyen una infraestructura deficiente y temporadas de campo limitadas, lo que aumentaría los costes y requeriría más tiempo y recursos humanos.

**Los segmentos a lo largo del margen de los Andes proporcionan una oportunidad única para controlar y variar muchos factores relacionados con nuestras preguntas de investigación.** Los climas a lo largo del antearco de los Andes están controlados por la circulación atmosférica y oceánica a macroescala, que establece grandes diferencias climáticas a lo largo de los segmentos de la zona de subducción. La escala de los segmentos de la zona de subducción es lo suficientemente grande como para discriminar los efectos de los segmentos de ruptura individuales y los límites de los sistemas climáticos entre sí. Por ejemplo, las comparaciones entre los segmentos ecuatoriano, Arica y Maule-Valdivia controlan las geometrías tectónicas, pero permiten explorar las variaciones climáticas, lo que afecta el suministro de sedimentos a la fosa de subducción. Las comparaciones entre los segmentos de Arica y Ipampeanos permiten mantener el clima fijo, mientras que la geometría tectónica podría estudiarse. Las comparaciones entre algunas partes de los segmentos peruano y pampeano podrían permitir que el clima varíe en las áreas de subducción de losas planas.

**En general, el grupo señaló que hay “gradientes sobre gradientes” dentro del sistema de subducción andino más grande, que proporcionan una oportunidad rica para construir un número sustancial de experimentos teóricos.**

Un experimento impulsado por PI a menor escala fuera de estas regiones, pero que se combina con el segmento pampeano de Chile, lo compararía con el segmento peruano del margen andino, que implica la subducción de las planas pero tiene climas diferentes. Otros sistemas emparejados considerados potencialmente fructíferos incluyen la subducción Nankai y Cocos-Panamá (en el área del norte de Costa Rica), donde las tasas de convergencia son ampliamente similares, pero el espesor del sedimento que entra en la fosa varía sistemáticamente entre los dos sistemas. En Nankai, la sección sedimentaria gruesa se asocia con la acumulación activa del margen, mientras que la placa de Cocos con sedimentos no tiene y parece tener una cinemática de deformación de la placa superior fundamentalmente diferente. Estas dos situaciones de contraste probablemente alteran el balance energético entre estas zonas de subducción, ya que la transferencia de masa desde la losa descendente a la placa superior transfiere energía al sistema de zona de subducción (**Pregunta de investigación 2**).

Los miembros del grupo de trabajo de L&S observaron oportunidades particulares para aprovechar las inversiones de otros países y organizaciones interesados en la investigación de zonas de subducción. Por ejemplo, ya existe una gran cantidad de información de las zonas de subducción de Nankai, el Mediterráneo y Hikurangi, estableciendo acuerdos cooperativos y de intercambio de datos con Japón, la UE y GNS Nueva Zelanda. Por lo tanto, aunque está claro que SZ4D no se activará en todos los sistemas de zonas de subducción de los que habló nuestro grupo, las asociaciones con organizaciones internacionales tienen el potencial de ampliar enormemente la amplitud de los descubrimientos científicos al aumentar el número de experimentos que podríamos ejecutar.

## ESQUEMA DEL PLAN INICIAL PARA LA COORDINACIÓN COMUNITARIA

La iniciativa de SZ4D proporciona una emocionante oportunidad para que la comunidad de procesos de superficie terrestre estudie relieves terrestres y relieves marinos de la zona de subducción. La coordinación comunitaria será especialmente importante para el éxito del componente de L&S de SZ4D. Consideramos que la comunidad abarca científicos comprometidos, instituciones y socios nacionales e internacionales que invierten colectivamente en SZ4D.

Para construir esta comunidad, proponemos una gama de programas a nivel de L&S de SZ4D para promover el compromiso de la comunidad, la creación de redes, el intercambio de ideas y, en última instancia, la síntesis de resultados. Un intercambio internacional de investigadores sería uno de esos programas para desarrollar la capacidad y la colaboración entre los países anfitriones. Los intercambios de estudiantes de posgrado y profesores patrocinados por SZ4D con países anfitriones internacionales crearían relaciones duraderas entre la comunidad científica global de la zona de subducción. Además, existe una gran cantidad de información recopilada por el posible país anfitrión de Chile, y más intercambios en los que participan estudiantes internacionales y científicos sénior ayudarían a integrar esta base de conocimientos previa en los esfuerzos de SZ4D. Una comunidad internacional exitosa requeriría que los socios fueran investigadores coequitativos con acceso a oportunidades educativas para ellos y sus estudiantes. Del mismo modo, un programa nacional de intercambio de estudiantes de posgrado entre los PI respaldados por SZ4D fomentaría el intercambio de ideas y la integración de la investigación necesaria para un programa de L&S exitoso. Los programas de intercambio de estudiantes aprendices de posgrado internacionales y nacionales ayudarían a coordinar la investigación a nivel de estudiante y de PI, pero lo que es más importante,

promete ampliar la base de conocimientos de los estudiantes participantes, ampliar sus redes profesionales e impulsar una comunidad de líderes de próxima generación en ciencia de procesos superficiales de zonas de subducción. Además, un programa estructurado y coordinado de formación e intercambio podría reconocer las contribuciones pendientes a la investigación de procesos superficiales de la zona de subducción. Prevemos asociarnos con programas científicos de desarrollo de capacidades públicos y privados existentes, como los patrocinados por la Oficina de Asistencia Humanitaria de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), GeoHazards International y otros.

Las reuniones ofrecen otro medio de construcción de la comunidad de L&S de SZ4D. Tenemos previsto celebrar talleres, seminarios web, conferencias y viajes de campo internacionales y nacionales patrocinados por L&S de SZ4D ara un mayor desarrollo comunitario. Estos eventos tendrán temas tópicos y de planificación con objetivos definidos. Por ejemplo, los eventos pueden servir para coordinar experimentos y conjuntos de datos de PI nuevos, en curso y pasados, identificar nuevas necesidades de investigación e infraestructura, mostrar nuevos estudios y hallazgos y sintetizar resultados a través de límites disciplinares, organizativos y políticos. Estos eventos también proporcionarían una plataforma para organizar la logística y evaluar el progreso hacia los objetivos generales de la ciencia de L&S. El grupo de trabajo de L&S ve el beneficio en un medio centralizado de facilitar oportunidades de intercambio, desarrollar redes profesionales y fomentar una nueva comunidad científica.

Es necesaria una estructura para la coordinación de la ciencia comunitaria para construir una red comprometida de científicos, institutos e instalaciones participantes necesarios para la ejecución de prioridades científicas, actividades de investigación y gestión de datos. Presentamos dos posibles estructuras organizativas de los miembros finales que facilitan los experimentos teóricos de L&S de SZ4D a través de estudios impulsados por PI. Ambas estructuras organizativas tienen como objetivo maximizar la

transparencia, crear consenso comunitario sobre objetivos científicos esenciales y organizar investigaciones y flujos de datos impulsados por PI para permitir esfuerzos en toda la comunidad para permitir una síntesis completa y exitosa de los resultados. Un plan de coordinación implica la identificación de las prioridades científicas generales necesarias para lograr los objetivos de los experimentos de imagen más amplia. Las solicitudes de programas se adaptarían cuidadosamente para estimular las propuestas de investigación impulsadas por PI dirigidas a los objetivos científicos identificados. Las propuestas se evaluarían en cuanto a calidad y alineación con la misión enviada dentro de la solicitud específica y SZ4D de forma más amplia. El objetivo sería fomentar un ecosistema de ciencia y generación y uso compartido de datos impulsado por PI que produzca los componentes básicos necesarios para realizar los experimentos notariales más amplios. Una estructura organizativa alternativa se centra en la creación de un grupo asesor científico con la tarea de encontrar un consenso de objetivos científicos que impulsen la toma de decisiones y el diseño del estudio para garantizar que se complete cada componente esencial del experimento. Este modelo difiere del último en que los objetivos del programa son más específicos, y una comunidad más amplia se dedica a generar consenso sobre los objetivos científicos incrementales. En este caso, la ciencia seguiría estando impulsada por el PI, pero las directivas del programa estarían más estrechamente vinculadas a los objetivos definidos por la comunidad. Esta estructura de asesoramiento impulsada por la comunidad podría permitir la adaptación a las preguntas emergentes de SZ4D y la alineación continua de las investigaciones sobre las prioridades científicas impulsadas por la comunidad.

Para poder simular sistemas de subducción, se necesita coordinación comunitaria para el desarrollo, la implementación y el mantenimiento de infraestructura tecnológica, de adquisición de datos y de modelado a gran escala y para el soporte y acceso a instalaciones analíticas. Muchas mediciones de la SATM de nivel 1 de

L&S implican estudios de detección remota terrestre y submarina (drones, aviones y satélites) con grandes huellas espaciales. Además, la ESN SurfArray requerirá un soporte sustancial de las instalaciones para implementar, mantener y gestionar los datos de esta red de instrumentos. Estos flujos de datos requieren asociaciones y soporte para las instalaciones existentes que mantienen la experiencia, el equipo y las capacidades de infraestructura disponibles. En algunos casos, estas capacidades y datos ya existen o pronto estarán disponibles (p. ej., NASA-ISRO INSAR, misiones Sentinel de Copernicus de la AEE, imágenes comerciales de alta resolución) y las asociaciones de SZ4D podrían servir para facilitar y agilizar el acceso a los datos. En otros casos, existen datos e infraestructura que ayudan a mantener flujos de datos, pero el soporte adicional de SZ4D ayudará a ampliar las capacidades existentes para manejar las necesidades de L&S (p. ej., Servicio Geológico de Estados Unidos [USGS], OpenTopography, NASA Earthdata, IRIS, UNAVCO, CUAHSI). Por último, se necesitan nuevos desarrollos tecnológicos e infraestructura asociada para integrar conjuntos de datos generados en los relieves terrestres y relieves marinos de la zona de subducción (p. ej., una fusión perfecta de datos topográficos y batimétricos nuevos y existentes) que se puedan desarrollar y mantener asociándose con instalaciones existentes y/o formando nuevas unidades organizativas dentro de SZ4D.

Los datos analíticos (p. ej., geocronología) deben adquirirse y sintetizarse para probar hipótesis de L&S. A diferencia de muchos de los grandes datos centralizados

instalaciones que se pueden utilizar para procesar y archivar datos de detección remota, las instalaciones geocronológicas son numerosas y algo heterogéneas en sus instrumentación y protocolos. Por lo tanto, SZ4D necesitará un vehículo para permitir que los PI individuales involucrados en las investigaciones de SZ4D accedan a estas instalaciones heterogéneas de una manera que mantenga una calidad de datos coherente mediante la adopción de protocolos comunes y la estandarización. Sugerimos dibujar

y ampliar las inversiones existentes en fondos de fondos insuficientes en EarthCube para garantizar que los resultados sean comparables entre los laboratorios y los segmentos de zonas de subducción. Mediante la coordinación de SZ4D entre modeladores, científicos de campo y geocronólogos, se identificarán las necesidades clave de modelado y se generarán nuevas capacidades para la comprobación de hipótesis utilizando modelos de sistemas de subducción acoplados. Para este esfuerzo es fundamental la coordinación y colaboración con SZ4D-MCS para ayudar a identificar objetivos científicos clave y necesidades de modelado para cumplir los objetivos de investigación de L&S. Además, este proceso puede beneficiarse de la base existente para el desarrollo de modelos numéricos geodinámicos de procesos de superficie acoplada y la infraestructura proporcionada por organizaciones patrocinadas por NSF como CSDMS y CIG. Las colaboraciones entre estas organizaciones ya han llevado al desarrollo de una nueva infraestructura capaz de acoplar más fácilmente modelos de procesos geodinámicos y de superficie terrestre. Lo ideal sería que L&S colaborara e integrara estos esfuerzos existentes y ayudara a inspirar nuevos esfuerzos y capacidades de modelado.

## BARRA LATERAL 4

*Deslizamientos de tierra y efectos descendentes en cascada*

Los grandes deslizamientos de tierra activados de forma sísmica, climática o volcánica en cuencas hidrográficas montañosas comúnmente desencadenan una cascada de peligros aguas abajo (p. ej., Pierson y Major, 2014; Fan et al., 2018). Los flujos de detritos de largo recorrido y las avalanchas destruyen la infraestructura lejos de la falla de la pendiente (**Figura S4-1A, B**) (p. ej., Voight, 1990; Wartman et al., 2016), y donde se encuentran con lagos o depósitos producen tsunamis catastróficos (p. ej., Genevois y Ghirotti, 2005; Wiles y Calkin, 1992). Con frecuencia, los deslizamientos de tierra producen presas que embalsan agua durante días o meses después de un deslizamiento de tierra (**Figura S4-1B**), lo que provoca inundaciones masivas tras una falla gravitacional (**Figura S4-1C**) (p. ej., Costa y Schuster, 1988). Los deslizamientos de tierra también pueden redirigir ríos forzando avulsiones (**Figura S4-1B**) e inhibir el transporte de sedimentos gruesos, lo que da lugar a una ampliación de 10 metros de gravilla para kilómetros aguas arriba de deslizamientos de tierra (p. ej., Finnegan et al., 2019), causando estragos en la infraestructura y los ecosistemas a lo largo del corredor del río (p. ej., Korup, 2014). Finalmente, pueden producirse grandes cambios en la elevación del río a través de la primera degradación y luego la incisión debido al transporte aguas abajo de residuos durante siglos después de grandes deslizamientos de tierra (**Figura S4-1A, B, C**) (p. ej., Stolle et al., 2019) y pueden afectar a comunidades a >100 km de distancia (Sarker et al., 2014).

## REFERENCIAS

- Avouac, J.-P. (2015). From geodetic imaging of seismic and aseismic fault slip to dynamic modeling of the seismic cycle. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43, 233–271. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060614-105302>
- Barnes, J.D., Cullen, J., Barker, S., Agostini, S., Penniston-Dorland, S., Lassiter, J. C., Klügel, A., & Wallace, L. (2019). The role of the upper plate in controlling fluid-mobile element (Cl, Li, B) cycling through subduction zones: Hikurangi forearc, New Zealand. *Geosphere*, 15, 642–658. <https://doi.org/10.1130/GES02057.1>
- Béjar-Pizarro, M., Socquet, A., Armijo, R., Carrizo, D., Genrich, J., & Simons, M. (2013). Andean structural control on interseismic coupling in the North Chile subduction zone. *Nature Geoscience*, 6, 462–467. <https://doi.org/10.1038/ngeo1802>
- Bhattacharya, S., Hyodo, M., Nikitas, G., Ismael, B., Suzuki, H., Lombardi, D., Egami, S., Watanabe, G. & Goda, K. (2018). Geotechnical and infrastructural damage due to the 2016 Kumamoto earthquake sequence. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 104, 390–394. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.11.009>
- Binnie, A., Dunai, T. J., Binnie, S. A., Victor, P., González, G., & Bolten, A. (2016). Accelerated late quaternary uplift revealed by <sup>10</sup>Be exposure dating of marine terraces, Mejillones Peninsula, northern Chile. *Quaternary Geochronology*, 36, 12–27. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2016.06.005>
- Booth, A. M., McCarley, J., Hinkle, J., Shaw, S., Ampuero, J.-P., & Lamb, M. P. (2018). Transient reactivation of a deep-seated landslide by undrained loading captured with repeat airborne and terrestrial lidar. *Geophysical Research Letters*, 45, 4841–4850. <https://doi.org/10.1029/2018GL077812>
- Bruni, E. T., Ott, R. F., Picotti, V., Haghipour, N., Wegmann, K. W., & Gallen, S. F. (2021). Stochastic alluvial fan and terrace formation triggered by a high-magnitude Holocene landslide in the Klados Gorge, Crete. *Earth Surface Dynamics Discussions*, <https://doi.org/10.5194/esurf-2021-4>
- Bürgmann, R., Rosen, P. A., & Fielding, E. J. (2000). Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28, 169–209, <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.169>
- Capra, L., & Macías, J. L. (2002). The cohesive Naranjo debris-flow deposit (10 km<sup>3</sup>): A dam breakout flow derived from the Pleistocene debris-avalanche deposit of Nevado de Colima Volcano (México). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 117, 213–235. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(02\)00245-7](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(02)00245-7)
- Costa, J. E., & Schuster, R. L. (1988). The formation and failure of natural dams. *Geological society of America bulletin*, 100(7), 1054–1068
- Del Castello, M., & Cooke M. L. (2007). Underthrusting-accretion cycle: Work budget as revealed by the boundary element method. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B12). <https://doi.org/10.1029/2007JB004997>
- Dielforder, A., Hetzel, R., & Oncken, O. (2020). Megathrust shear force controls mountain height at convergent plate margins. *Nature*, 582, 225–229. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2340-7>
- Fan, X., Scaringi, G., Korup, O., West, A. J., van Westen, C. J., Tanyas, H., et al. (2019). Earthquake-induced chains of geologic hazards: Patterns, mechanisms, and impacts. *Reviews of geophysics*, 57(2), 421–503
- Finnegan, N. J., Broudy, K. N., Nereson, A. L., Roering, J. J., Handwerker, A. L., & Bennett, G. (2019). River channel width controls blocking by slow-moving landslides in California's Franciscan mélange. *Earth Surface Dynamics*, 7(3), 879–894
- Fuller, C. W., Willett, S. D., & Brandon, M. T. (2006). Formation of forearc basins and their influence on subduction zone earthquakes. *Geology*, 34, 65–68. <https://doi.org/10.1130/G21828.1>
- Gallen, S. F., Wegmann, K. W., Bohnenstiehl, D. R., Pazzaglia, F. J., Brandon, M. T., & Fassoulas, C. (2014). Active simultaneous uplift and margin-normal extension in a forearc high, Crete, Greece. *Earth and Planetary Science Letters*, 398, 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.04.038>
- Gallen, S. F., & Wegmann, K. W. (2017). River profile response to normal fault growth and linkage: An example from the Hellenic forearc of south-central Crete, Greece. *Earth Surface Dynamics*, 5, 161–186. <https://doi.org/10.5194/esurf-5-161-2017>
- Gallen, S. F., & Fernández-Blanco, D. A. (2021). New data-driven Bayesian inversion of fluvial topography

- clarifies the tectonic history of the Corinth Rift and reveals a channel steepness threshold. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 126, e2020JF005651. <https://doi.org/10.1029/2020JF005651>
- Genevois, R., & Ghirotti, M. (2005). The 1963 vaiont landslide. *Giornale di Geologia Applicata*, 1(1), 41-52.
- Korup, O. (2004). Landslide-induced river channel avulsions in mountain catchments of southwest New Zealand. *Geomorphology*, 63(1-2), 57-80
- Gran, K. B. (2012). Strong seasonality in sand loading and resulting feedbacks on sediment transport, bed texture, and channel planform at Mount Pinatubo, Philippines. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37, 1012-1022. <https://doi.org/10.1002/esp.3241>
- Gudmundsson, A. (2012). Strengths and strain energies of volcanic edifices: implications for eruptions, collapse calderas, and landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, 2241-2258. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-2241-2012>
- Handwerger, A. L., Fielding, E. J., Huang, M.-H., Bennett, G. L., Liang, C., & Schulz, W. H. (2019). Widespread initiation, reactivation, and acceleration of landslides in the northern California Coast Ranges due to extreme rainfall. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124(7), 1782-1797. <https://doi.org/10.1029/2019JF005035>
- Harris, R. A., Barall, M., Archuleta, R., Dunham, E., Aagaard, B., Ampuero, J. P., Bhat, H., Cruz-Atienza, V., Dalguer, L., Dawson, P., and Day, S. (2009). The SCEC/USGS dynamic earthquake rupture code verification exercise. *Seismological Research Letters*, 80, 119-126. <https://doi.org/10.1785/gssrl.80.1.119>
- Hill, J. C., Watt, J. T., Brothers, D. S., & Kluesner, J. W. (2020). Submarine canyons, slope failures and mass transport processes in southern Cascadia. *Geological Society, London, Special Publications*, 500, 453-475. <https://doi.org/10.1144/SP500-2019-169>
- Hilley, G. E., Sare, R. M., Aron, F., Baden, C. W., Caress, D. W., Castillo, C. M., Dobbs, S. C., et al. (2020). Coexisting seismic behavior of transform faults revealed by high-resolution bathymetry. *Geology*, 48, 379-384. <https://doi.org/10.1130/G46663.1>
- Hughes, A., Escartín, J., Olive, J.-A., Billant, J., Deplus, C., Feuillet, N., Leclerc, F., & Malatesta, L. (2021). Quantification of gravitational mass wasting and controls on submarine scarp morphology along the Roseau Fault, Lesser Antilles. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 126, 2020JF005892. <https://doi.org/10.1029/2020JF005892>
- Karakas, O., Degruyter, W., Bachmann, O., & Dufek, J. (2017). Lifetime and size of shallow magma bodies controlled by crustal-scale magmatism. *Nature Geoscience*, 10, 446-450. <https://doi.org/10.1038/ngeo2959>
- Karlstrom, L., Paterson, S., & Jellinek, A. (2017). A reverse energy cascade for crustal magma transport. *Nature Geoscience*, 10, 604-608. <https://doi.org/10.1038/ngeo2982>
- Karlstrom, L., Richardson, P. W., O'Hara, D., & Ebmeier, S. K. (2018). Magmatic landscape construction. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123, 1710-1730. <https://doi.org/10.1029/2017JF004369>
- Korup, O., Seidemann, J., & Mohr, C. H. (2019). Aumento de la actividad de deslizamiento de tierra en laderas boscosas después de dos recientes erupciones volcánicas en Chile. *Nature Geoscience*, 12, 284-289. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0315-9>
- LaHusen, S. R., Duvall, A. R., Booth, A. M., & Montgomery, D. R. (2016). Surface roughness dating of long-runout landslides near Oso, Washington (USA), reveals persistent postglacial hillslope instability. *Geology*, 44, 111-114. <https://doi.org/10.1130/G37267.1>
- LaHusen, S. R., Duvall, A. R., Booth, A. R., Grant, A., Mishkin, B. A., Montgomery, D. R., Struble, W., et al. (2020). Rainfall triggers more deep-seated landslides than Cascadia earthquakes in the Oregon Coast Range, USA. *Science Advances*, 6, eaba6790. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba6790>
- Lee, C.-T., Thurner, S., Patterson, S., & Cao, W. (2015). The rise and fall of continental arcs: Interplays between magmatism, uplift, weathering, and climate. *Earth and Planetary Science Letters*, 425, 105-119. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.05.045>
- Major, J. J., Bertin, D., Pierson, T. C., Amigo, Á., Iroumé, A., Ulloa, H., & Castro, J. (2016). Extraordinary sediment delivery and rapid geomorphic response following the 2008-2009 eruption of Chaitén Volcano, Chile. *Water Resources Research*, 52, 5075-5094. <https://doi.org/10.1002/2015WR018250>
- Major, J. J., Spicer, K. R., & Mosbrucker, A. R. (2021). Effective hydrological events in an evolving mid-latitude mountain river system following cataclysmic disturbance - A saga of multiple influences: *Water Resources*

- Research, 57, e2019WR026851. <https://doi.org/10.1029/2019WR026851>
- Malatesta, L. C., Bruhat, L., Finnegan, N. J., & Olive, J. L. (2021). Co-location of the downdip end of seismic coupling and the continental shelf break. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, e2020JB019589. <https://doi.org/10.1029/2020JB019589>
- Martel, S. J. (2004). Mechanics of landslide initiation as a shear fracture phenomenon. *Marine Geology*, 203, 319–339. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(03\)00313-X](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(03)00313-X)
- Murray, K. D., & Lohman, R. B. (2017). Short-lived pause in Central California subsidence after heavy winter precipitation of 2017. *Science Advances*, 4, eaar8144. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aar8144>
- Maccaferri, F., Rivalta, E., Keir, D., & Acocella, V. (2014). Off-rift volcanism in rift zones determined by crustal unloading. *Nature Geoscience*, 7, 297–300. <https://doi.org/10.1038/ngeo2110>
- Olive, J.-A., Behn, M. D., & Malatesta, L. C. (2014). Modes of extensional faulting controlled by surface processes. *Geophysical Research Letters*, 41, 6725–6733. <https://doi.org/10.1002/2014GL061507>
- Olivetti, V., Cyr, A. J., Molin, P., Faccenna, C., & Granger, D. E. (2012). Uplift history of the Sila Massif, southern Italy, deciphered from cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  erosion rates and river longitudinal profile analysis. *Tectonics*, 31(3), <https://doi.org/10.1029/2011TC003037>
- Ott, R. F., Gallen, S. F., Wegmann, K. W., Biswas, R. H., Herman, F., and Willett, S. D. (2019a). Pleistocene terrace formation, Quaternary rock uplift rates and geodynamics of the Hellenic Subduction Zone revealed from dating of paleoshorelines on Crete, Greece. *Earth and Planetary Science Letters*, 525, 115757, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.115757>
- Ott, R. F., Gallen, S. F., Caves Rugenstein, J. K., Ivy-Ochs, S., Helman, D., Fassoulas, C., Vockenhuber, C., Christl, M., & Willett, S. D. (2019b). Chemical versus mechanical denudation in meta-clastic and carbonate bedrock catchments on Crete, Greece, and mechanisms for steep and high carbonate topography. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124, 2943–2961. <https://doi.org/10.1029/2019JF005142>
- Ott, R. F., Wegmann, K. W., Gallen, S. F., Pazzaglia, F. J., Brandon, M. T., Ueda, K., & Fassoulas, C. (2021). Reassessing Eastern Mediterranean tectonics and earthquake hazard from the 365 CE earthquake. *AGU Advances*, 2, e2020AV000315. <https://doi.org/10.1029/2020AV000315>
- Penseri, B. D., Roering, J. J., & Streig, A. (2017). A morphologic proxy for debris flow erosion with application to the earthquake deformation cycle, Cascadia Subduction Zone, USA. *Geomorphology*, 282, 150–161, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.01.018>
- Pierson, T. C., & Major, J. J. (2014). Hydrogeomorphic effects of explosive volcanic eruptions on drainage basins. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 42, 469–507
- Saillard, M., Hall, S. R., Audin, L., Farber, D. L., Regard, V., & Hérail, G. (2011). Andean coastal uplift and active tectonics in southern Peru:  $^{10}\text{Be}$  surface exposure dating of differentially uplifted marine terrace sequences (San Juan de Marcona,  $\sim 15.4^\circ\text{S}$ ). *Geomorphology*, 128, 178–190, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.01.004>
- Saillard, M., Audin, L., Rousset, B., Avouac, J.-P., Chlieh, M., Hall, S. R., Husson, L., & Farber, D. L. (2017). From the seismic cycle to long-term deformation: linking seismic coupling and Quaternary coastal geomorphology along the Andean megathrust. *Tectonics*, 36, 241–256. <https://doi.org/10.1002/2016TC004156>
- Sarker, M. H., Thorne, C. R., Aktar, M. N., & Ferdous, M. R. (2014). Morpho-dynamics of the Brahmaputra–Jamuna river, Bangladesh. *Geomorphology*, 215, 45–59
- Shirzaei, M., Ellsworth, W. L., Tiampo, K. F., Gonzalez, P. J., & Manga, M. (2016). Surface uplift and time-dependent seismic hazard due to fluid injection in eastern Texas. *Science*, 353(6306), 1416–1419. <https://doi.org/10.1126/science.aag0262>
- Schoettle-Greene, P., Duvall, A. R., Blythe, A., Morley, E., Matthews, W., and LaHusen, S. R. (2020). Uplift and exhumation in Haida Gwaii driven by terrane translation and transpression along the southern Queen Charlotte fault, Canada. *Geology*, 48, 908–912. <https://doi.org/10.1130/G47364.1>
- Stevens Goddard, A. L., & Fosdick, J. C. (2019). Multichronometer thermochronologic modeling of migrating spreading ridge subduction in southern Patagonia. *Geology*, 47, 555–558, <https://doi.org/10.1130/G46091.1>
- Stolle, A., Schwanghart, W., Andermann, C., Bernhardt, A., Fort, M., Jansen, J. D., et al. (2019). Protracted river response to medieval earthquakes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(1), 331–341
- Sutherland, R., Gurnis, M., Kamp, P. J. J., & House, M. A. (2009). Regional exhumation history of brittle crust

- during subduction initiation, Fiordland, southwest New Zealand, and implications for thermochronologic sampling and analysis strategies. *Geosphere*, 5, 409–425. <https://doi.org/10.1130/GES00225.1>
- Thomson, S. N., Stöckhert, B., & Brix, M. R. (1998). Thermochronology of the high-pressure metamorphic rocks of Crete, Greece: Implications for the speed of tectonic processes. *Geology*, 26, 259–262. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1998\)026<0259:TOTHPM>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1998)026<0259:TOTHPM>2.3.CO;2)
- Villagómez, D., & Spikings, R. (2013). Thermochronology and tectonics of the Central and Western Cordilleras of Colombia: Early Cretaceous–Tertiary evolution of the Northern Andes. *Lithos*, 160–161, 228–249. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.12.008>
- Voight, B. (1990). The 1985 Nevado del Ruiz volcano catastrophe: anatomy and retrospection. *Journal of volcanology and geothermal research*, 42(1-2), 151–188
- Wang, K. (2020). Mountain height might be controlled by tectonic force, rather than erosion. *Nature*, 582, 189–190. <https://doi.org/10.1038/d41586-020-01601-4>
- Wartman, J., Montgomery, D. R., Anderson, S. A., Keaton, J. R., Benoît, J., dela Chapelle, J., & Gilbert, R. (2016). The 22 March 2014 Oso landslide, Washington, USA. *Geomorphology*, 253, 275–288
- Watt, S. F., Pyle, D. M. & Mather, T. A. (2013). The volcanic response to deglaciation: Evidence from glaciated arcs and a reassessment of global eruption records. *Earth-Science Reviews*, 122, 77–102. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.03.007>
- Wells, S. G., Bullard, T. F., Menges, C. M., Drake, P. G., Karas, P. A., Kelson, K. I., Ritter, J. B. & Wesling, J. R. (1988). Regional variations in tectonic geomorphology along a segmented convergent plate boundary Pacific coast of Costa Rica. *Geomorphology*, 1, 239–265. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(88\)90016-5](https://doi.org/10.1016/0169-555X(88)90016-5)
- Wiles, G. C., & Calkin, P. E. (1992). Reconstruction of a debris-slide-initiated flood in the southern Kenai Mountains, Alaska. *Geomorphology*, 5(6), 535–546
- Willett, S. D. (1999). Orogeny and orography: The effects of erosion on the structure of mountain belts. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104, 28,957–28,981. <https://doi.org/10.1029/1999JB900248>

# DESENCADENANTES MAGMÁTICOS DE ERUPCIONES



¿QUÉ CONTROLA LA UBICACIÓN DE LOS VOLCANES  
Y LA APARICIÓN DE ERUPCIONES?

## MOTIVACIÓN CIENTÍFICA

Observaciones e innovaciones recientes están impulsando un nuevo esfuerzo cada año en el estudio de los desencadenantes magmáticos de la subd (MDE). Se han observado “iluminación” de las vías de magma en la corteza, con aumentos en los eventos sísmicos antes, entre y durante las erupciones (p. ej., Pesicek et al., 2018) y algunas regiones de almacenamiento de magma que inflan y aplacan (“respiran”) durante el ciclo de erupción (p. ej., Xue et al., 2020). Nuevos estudios petrológicos y geoquímicos han descubierto que el acoplamiento, el transporte y la preparación del magma hasta las erupciones se producen a lo largo de escalas de horas a años (Costa, 2021), similares a las escalas de tiempo del desequilibrio volcánico observado. Los cambios en el CO<sub>2</sub>/SO<sub>2</sub> de gas medidos semanas a meses antes de la erupción (p. ej., Aiuppa et al., 2017) proporcionan una posible señal de recarga de magma profundo y un nuevo flujo de datos precursores para

integrarse en modelos de previsión basados en la física (Shreve et al., 2019). La geocronología de alta resolución durante el ciclo de vida de los volcanes (~ 500 kA) muestra evidencia de cambios en el comportamiento eruptivo que está al ritmo de los ciclos glaciales (Watt et al. 2013; Aubry et al., 2022).

El plan de implementación de MDE de SZ4D está motivado por descubrimientos científicos y urgencia social. A nivel mundial, casi 800 millones de personas viven en regiones que están directamente expuestas a peligros volcánicos (Brown et al., 2015), y la gran mayoría de estas regiones se encuentran en entornos de zonas de subducción. Los sistemas magmáticos de la corteza asociados con el volcanismo de la zona de subducción también producen recursos minerales y energéticos críticos, así como también impulsan la formación y evolución de la corteza continental. La iniciativa SZ4D se basa en los programas MARGINS, GeoPRISMS y EarthScope, que tuvieron un gran éxito en el

seguimiento de volátiles magmáticos a través del proceso de subducción, la formación de imágenes se fundió en la corteza y el manto, y modeló la estructura térmica de las losas de subducción y el crecimiento de la corteza continental. El nuevo enfoque de MDE se centra en **el inicio de las erupciones volcánicas en las zonas de subducción**, ya que reconocemos que hay nuevos descubrimientos que se deben hacer que conecten los volcanes más peligrosos del planeta hoy en día con los condicionantes de la subducción subyacentes. Los magmas en las zonas de subducción son ricos en volatilidad y, por lo tanto, inherentemente diferentes de los de otros entornos volcánicos. Además, las zonas de subducción son responsables de la mayor parte de la actividad eruptiva subaerial que se produce cada año. Un trabajo reciente implica todo el sistema magmático transcortical (Cashman et al., 2017) e incluso el manto controla el inicio de las erupciones (Grove et al., 2012; Power et al., 2013; Ruprecht y Plank, 2013). Aquí proponemos investigar todo el sistema de controles sobre el comportamiento volcánico/plutónico en arcos volcánicos en cuatro dimensiones (**Figura MDE-1**). Al centrarse en el sistema magmático transcortical y en cómo une la región de fusión del manto por encima de las losas de subducción y los magmas y gases emitidos en los arcos volcánicos, SZ4D proporcionará una perspectiva fundamentalmente nueva sobre los sistemas volcánicos relacionados con la subducción, con el objetivo de identificar los condicionantes de la subducción y desarrollar previsiones a largo plazo de erupciones.

Una pregunta central motiva las actividades científicas previstas de MDE: **¿Cómo inician los procesos transcorticales las erupciones en los arcos volcánicos?** El sistema magmático transcortical es fundamental para controlar el inicio de la erupción y el desequilibrio y la calma intereruptivas. Los procesos dentro del sistema transcortical ceban o inician erupciones volcánicas directamente o proporcionan condiciones adecuadas para que las intrusiones y/o erupciones puedan ser provocadas por desencadenantes externos como terremotos o colapso de estructuras.

Además, los procesos dinámicos que rigen la evolución de los sistemas magma transcortical, incluida la producción de magma de manto y la partición de masa y energía entre componentes volcánicos y plutónicos a lo largo y a través de arcos volcánicos, abarcan amplios rangos temporales. Aunque pueden producirse erupciones en breves intervalos de tiempo en la superficie de la Tierra, su frecuencia y vigor pueden establecerse mediante procesos a lo largo de la corteza y que se producen durante la vida útil del volcán o durante más tiempo (**Figura MDE-1**). Estos procesos transcorticales sustentan los mecanismos internos y externos que inician directamente erupciones a través de sobrepresión, falla de tracción y/o falla de cizallamiento en la subsuperficie. Estos mecanismos de iniciación también impulsan el estilo de la erupción, la composición, el volumen de la erupción, el comportamiento del desequilibrio y los plazos.

Este capítulo está estructurado para seguir el proceso desarrollado por el grupo de trabajo de MDE de SZ4D, con la aportación de la comunidad vulcanológica más amplia para definir:

- **Hipótesis centrales** que vinculan los desencadenantes de la erupción y las respuestas en las zonas de subducción
- **Una matriz de trazabilidad** que identifica actividades prácticas para respaldar las preguntas científicas que surgen de las hipótesis centrales
- **Experimentos teóricos** guiados por actividades y estrategias de la matriz de trazabilidad para el despliegue en segmentos y arcos volcánicos
- **Evaluación del sitio** que surge de un inventario de arcos volcánicos y sistemas exhumados y los requisitos de las hipótesis y experimentos teóricos
- **Actividades** que pueden preceder a experimentos de campo
- Esfuerzos paralelos de laboratorio y modelado
- **Coordinación comunitaria**

## La tabla de hipótesis

La pregunta central de MDE y el marco científico pueden articularse con mayor claridad en términos de controles y respuestas del sistema magmático (**Tabla MDE-1**). Nuestros objetivos finales son identificar los condicionantes de la subducción subyacentes y desarrollar previsiones útiles de erupción.

Los controles del sistema magmático se dividen en tres amplias categorías:

1. Las tasas de suministro del magma y los volátiles desde el manto hasta la corteza que, en última instancia, alimentan todas las erupciones
2. El volumen, la profundidad y la distribución del magma que definen colectivamente el

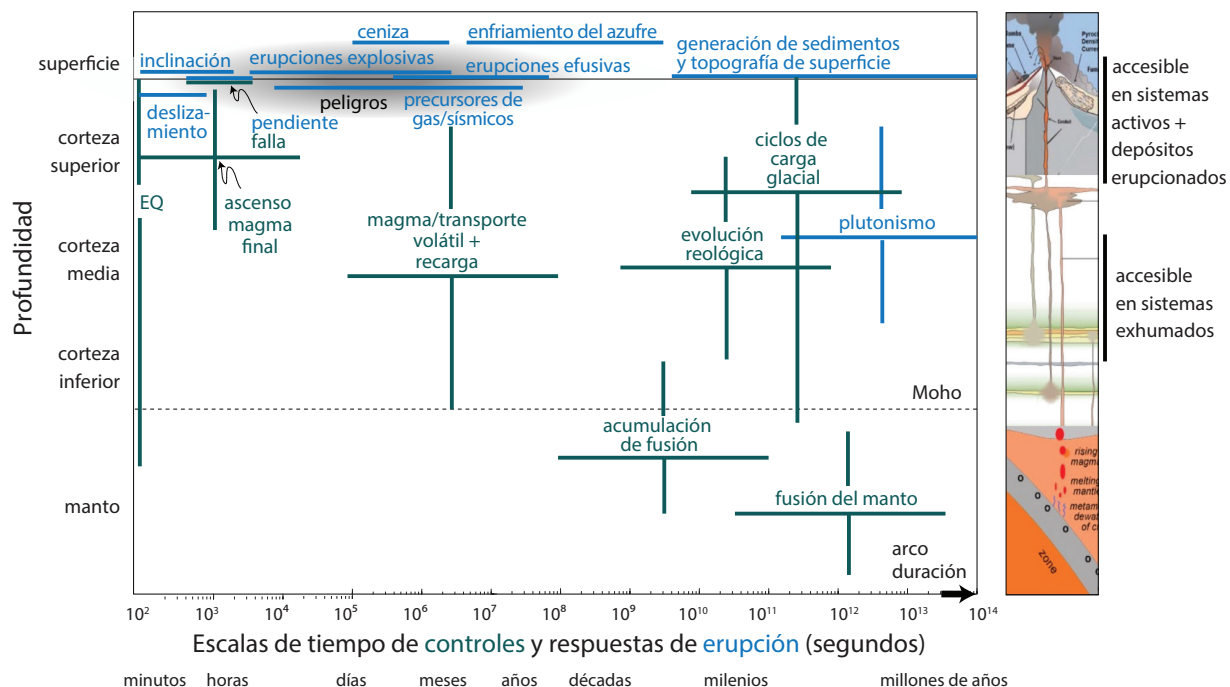
sistema transcortical de un volcán

3. La reología y el estado de estrés del magma y las rocas de la corteza circundantes que permiten o resisten el movimiento del magma

Las respuestas del sistema incluyen la consideración de:

1. Precursores de la erupción y el período previo a la erupción
2. Reposo de erupción, calma y desequilibrio abortados o intrusión que no culminan en erupción, lo que puede provocar plutonismo
3. Estilo, vigor y duración de la erupción: el resultado de previsiones útiles

**Figura MDE-1.** Procesos en múltiples escalas de tiempo y abarcando el sistema magmático transcortical impactan los peligros de la zona de subducción cerca de la superficie. El objetivo de la investigación de MDE es conectar el sistema volcánico, el sistema magmático transcortical y el sistema de subducción. Estos sistemas suelen tratarse por separado, aunque estén interrelacionados. Por ejemplo, las erupciones volcánicas pueden iniciarse rápidamente mediante la entrada de magmas máficos desde la cuña del manto. Pueden desarrollarse diferentes arquitecturas magmáticas transcorticales como respuesta a diferentes tasas de suministro de magma de manto. En términos más generales, los sistemas magmáticos de arco pueden responder e impulsar a FEC y L&S. Por ejemplo, los procesos superficiales tales como la descarga glacial pueden conducir a una mayor fusión de descompresión en el manto y una mayor frecuencia de erupción. SZ4D ofrece la oportunidad de probar diferentes hipótesis sobre cómo los procesos de subducción en una variedad de plazos, desde minutos hasta millones de años, impulsan el magmatismo y el volcanismo, y los peligros asociados con ellos. La columna de la derecha es una fusión de tres dibujos animados independientes (del informe ERUPT, NASEM, 2017), un reflejo de la falta de integración actual y la oportunidad de que SZ4D haga nuevas conexiones aprovechando las pruebas de volcanes activos, depósitos en erupción y sistemas de arcos exhumados en cuatro dimensiones.



La respuesta de un sistema magmático a cada control depende del estado del sistema magmático (volumen, profundidad y distribución de magma/presión) y de las propiedades mecánicas de la corteza huésped (reología y estado de estrés).

El grupo de trabajo de MDE consideró cómo los hallazgos recientes y los desarrollos metodológicos han llevado a hipótesis comprobables, e hizo que el grupo de Interés de MDE votara sobre cómo priorizar la tabla de hipótesis resultante. Es importante destacar que se solicitaron hipótesis adicionales, y luego los grupos se reunieron para analizar las hipótesis más convincentes y comprobables, así como las sinergias entre ellas.

Como resultado, se identificaron tres conjuntos principales de hipótesis:

**HIPÓTESIS A** | La composición del gas y el magma está vinculada a precursores de la erupción, tiempos de actividad previa e intensidades de la erupción

**HIPÓTESIS B** | La producción y la tasa de suministro de magma de manto están relacionadas con el balance de masa intrusivo/extrusivo, el tiempo de residencia de la corteza, el tiempo de reposo y la evolución de la arquitectura magmática de la corteza

**HIPÓTESIS C** | Los períodos y los condicionantes de diferentes desencadenantes de erupciones externas en escalas de tiempo de minutos a >100 000 años están vinculados

**Tabla MDE-1.** La tabla de hipótesis de MDE. Los controles y respuestas del sistema magmático definen una cuadrícula de hipótesis de investigación y comprobables.

Controles magmáticos del sistema	Respuestas magmáticas del sistema		
	Precusores de erupción y tiempo de funcionamiento	Plutonismo, intrusión y reposo	Estilo, vigor y duración de la erupción
<b>Tasas de suministro: Magma y volátiles</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Qué controla la tasa de producción en el manto?</li> <li>• ¿Qué controla la tasa de recarga?</li> <li>• ¿Qué controla la composición de la recarga?</li> <li>• ¿Qué controla la acumulación de volátiles?</li> </ul>	Semanas a mes con alto CO <sub>2</sub> /gases S antes de la recarga profunda de la señal de erupción <i>Werner et al. (2020)</i> Las erupciones máficas tienen tiempos de iniciación más cortos <i>Kent et al. (2019)</i>	El flujo intrusivo está relacionado con el flujo extrusivo <i>Till et al. (2019)</i> Las erupciones máficas tienen tiempos de reposo más cortos <i>Passarelli y Brodsky (2012)</i>	La subducción lenta se correlaciona con las cúpulas de lava <i>Zellmer (2009)</i> El rápido ascenso de magma produce erupciones de mayor intensidad <i>Gonnermann y Manga (2012)</i>
<b>Profundidad y distribución del magma</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cómo se desplaza el magma a través de toda la corteza?</li> <li>• ¿Qué profundidad tiene el sistema volcánico?</li> <li>• ¿Por qué y dónde se detienen los magmas?</li> <li>• ¿Qué controla las profundidades de almacenamiento antes de la erupción?</li> </ul>	El manto puede recargarse durante una erupción <i>Ruprecht y Plank (2013)</i> Ascenso lento de la vanguardia y estadificación de erupciones <i>Roman y Cashman (2018)</i> Sistemas de magma poco profundos debido a la imprimación térmica <i>Gualda et al. (2018)</i>	Profundidad óptima del crecimiento de la cámara de magma <i>Huber et al. (2019)</i> Enfoque de rocas plutónicas debido al debilitamiento térmico <i>Ardill (2018)</i> El suministro de magma influye en la ubicación del depósito <i>Lerner et al. (2020)</i>	Las erupciones plinianas basálticas provienen de sistemas magma poco profundos <i>Bamber et al. (2020)</i>
<b>Reología y estado de estrés</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Qué controla la densidad, viscosidad y volátiles del magma?</li> <li>• ¿Qué controla la reología de la corteza?</li> <li>• ¿Qué controla el estado de estrés de la corteza?</li> <li>• ¿Cuáles son las funciones de las fallas de las pendientes y los terremotos en el desencadenamiento de la erupción?</li> </ul>	Reología, estrés tectónico, control de flotabilidad, profundidades de estancamiento de magma <i>Watanabe et al. (1999)</i> Estrés estático por terremotos $M \geq 7.5$ < 200 km de distancia pueden desencadenar erupciones <i>Nishimura (2017)</i>	Los sistemas de magma silíceo tienen un reposo más largo <i>Passarelli y Brodsky (2012)</i> Más tiempo de reposo -> corteza debilitada y menor falla <i>DeGruyter y Huber (2014)</i> Los sistemas viscosos grandes requieren un desencadenante externo <i>Gregg et al. (2012)</i>	La extensión favorece las calderas <i>Wilson et al. (1995)</i> Los microlitos que crecen de forma rápida y heterogénea durante el ascenso desde el almacenamiento superficial pueden causar erupciones plinianas basálticas <i>Sable et al. (2006)</i> <i>Bamber et al. (2020)</i>

**HIPÓTESIS A** | La composición del gas y el magma está vinculada a precursores de la erupción, tiempos de actividad previa e intensidades de la erupción. Por ejemplo (**Figura MDE-2A**):

- El  $\text{CO}_2/\text{SO}_2$  alto observado en gases (semanas a meses) antes de la erupción indica una recarga profunda de magma (es decir, la recarga de magma impulsa los períodos de tiempo de actividad previa de la erupción).
- Las erupciones provocadas por el rejuvenecimiento máfico implican tiempos de inicio más cortos que el rejuvenecimiento félsico.
- El período previo a la erupción (a lo largo de años o durante todo el período intereruptivo) implica el ascenso sigiloso, la segunda ebullición (es decir, la exsolución de gas inducida por la cristalización) y la evolución magmática a composiciones más silíceas.
- Eficiencia de desgasificación durante el ascenso de magma que controla la intensidad de la erupción.

Las necesidades científicas críticas para probar estas hipótesis incluyen: restricciones y modelos para predecir la tasa de recarga de magmas, especialmente para magmas máficos; series de tiempo precursoras en química de gas y señales geofísicas; y medidas de eficiencia de desgasificación. Lo ideal sería que las redes de sensores capturasen eventos antes, durante y después de erupciones de intensidad variable en muchos objetivos volcánicos. Sería necesario un gran número de objetivos para capturar los desequilibrios y la erupción en volcanes que abarcan una serie de parámetros de subducción, incluida la tasa de subducción de agua, azufre y carbono, tasas de producción de magma y regímenes de estrés de la placa superior. Los plazos relevantes de los procesos son de minutos a décadas.

**HIPÓTESIS B** | La producción y la tasa de suministro de magma de manto están relacionadas con el balance de masa intrusivo/extrusivo, el tiempo

de residencia de la corteza, el tiempo de reposo y la evolución de la arquitectura magmática de la corteza. Por ejemplo (**Figura MDE-2B**):

- El flujo magmático derivado del manto elevado conduce a depósitos de magma poco profundos y/o a la progresión a largo plazo a profundidades de almacenamiento menos profundas (es decir, la “escalamiento cortical”).
- Los tiempos cortos de residencia en la corteza magmática (desde el manto hasta la superficie en días a meses) conducen a erupciones máficas de alta intensidad.
- La tasa de suministro de magma del manto está relacionada con los condicionantes de la subducción (tasa de convergencia, composición, temperatura y ángulo de la placa de subducción), así como con el estado del manto en la cuña, conectando finalmente la estructura y evolución del sistema magmático transcortical con los condicionantes de la subducción subyacentes.

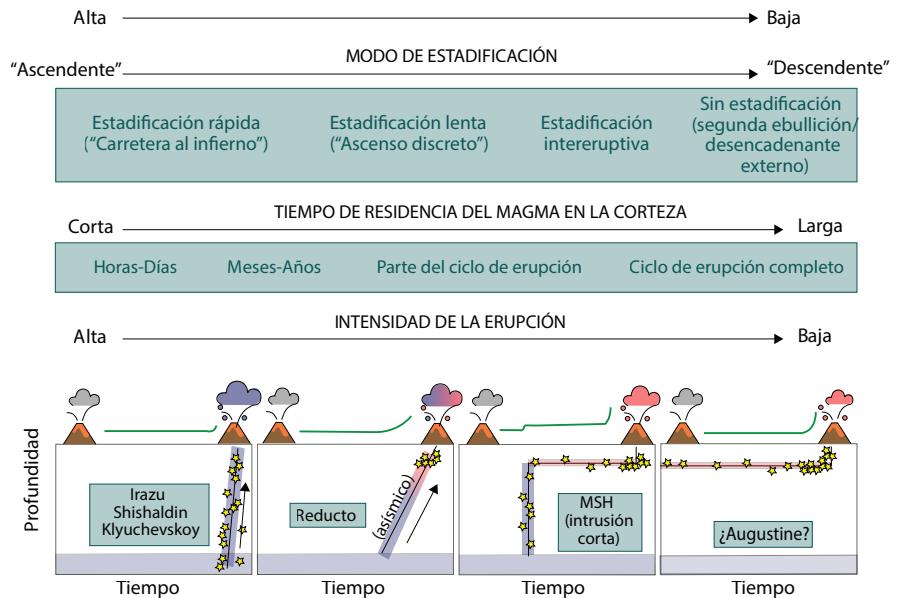
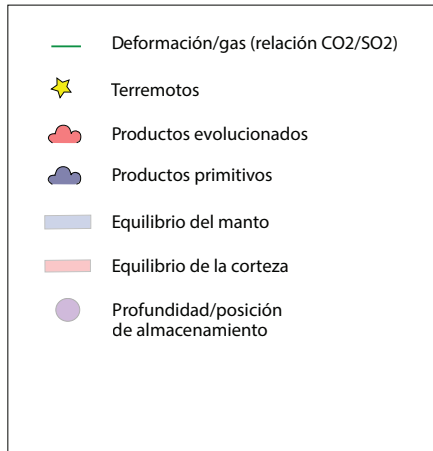
Para probar estas hipótesis, primero deben tomarse medidas clave, incluida la realización de imágenes geofísicas de alta resolución de sistemas magmáticos transcorticales, el mapeo detallado y los análisis geoquímicos de rocas erupcionadas en el pasado, experimentos de laboratorio y estudios de sistemas plutónicos y volcánicos exhumados en un pequeño número de sistemas bien elegidos que se instrumentan densamente y se estudian exhaustivamente para sus historias magmáticas. La asimilación de estos diversos flujos de datos dentro de modelos térmicos y mecánicos acoplados de intrusión y acumulación de magma en la corteza es fundamental para comprender los procesos que controlan la partición intrusiva-extrusiva de magma en escalas de tiempo de años a millones de años.

**HIPÓTESIS C** | Los períodos y los condicionantes de diferentes desencadenantes de erupciones externas en escalas de tiempo de minutos a >100 000 años están vinculados. Por ejemplo:

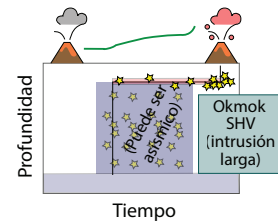
- La descarga glacial es un desencadenante

A

## TASA DE ASCENSO A MAGMA DE LA CORTEZA

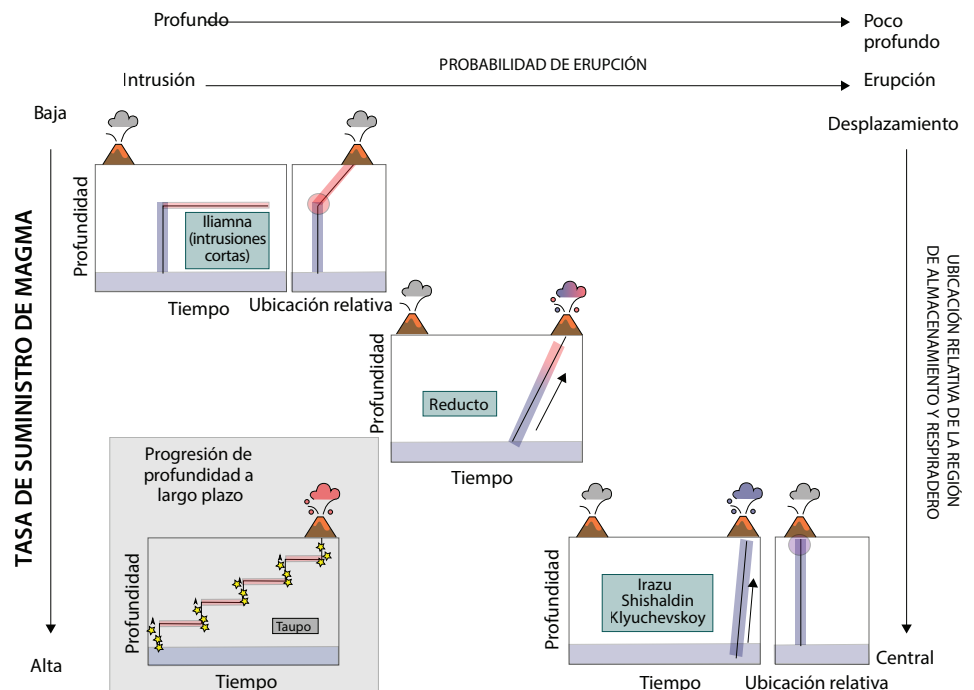


**Figura MDE-2.** (A) Resumen gráfico del conjunto de hipótesis A, que vincula la tasa de ascenso de la corteza (izquierda) con la estadificación de la corteza, el tiempo de residencia y la intensidad de la erupción; (B) Resumen gráfico del conjunto de hipótesis B, que vincula la tasa de suministro del magma de manto (derecha) con la profundidad del depósito de magma y la erupción frente a la probabilidad de intrusión.



B

## PROFUNDIDAD DEL DEPÓSITO DE MAGMA



externo que se produce en intervalos de tiempo de ~10 000 a 100 000 años.

- El colapso sectorial puede deberse a la alteración hidrotermal de las rocas de estructuras (cientos de años) o al crecimiento del domo (meses).
- El desencadenamiento por estrés estático y dinámico, como ocurre en los terremotos locales o telesísmicos, ocurre en horas o segundos, pero también requiere un sistema magmático que ha evolucionado con los años hacia la susceptibilidad de erupción.

Las necesidades científicas críticas para probar estas hipótesis incluyen:

- series de tiempo sísmicas en los plazos más cortos;
- series temporales de química geodésica y de gas en escalas de tiempo medias;
- y estudios de relieves, geológicos, petrológicos y geocronológicos en los plazos más largos.

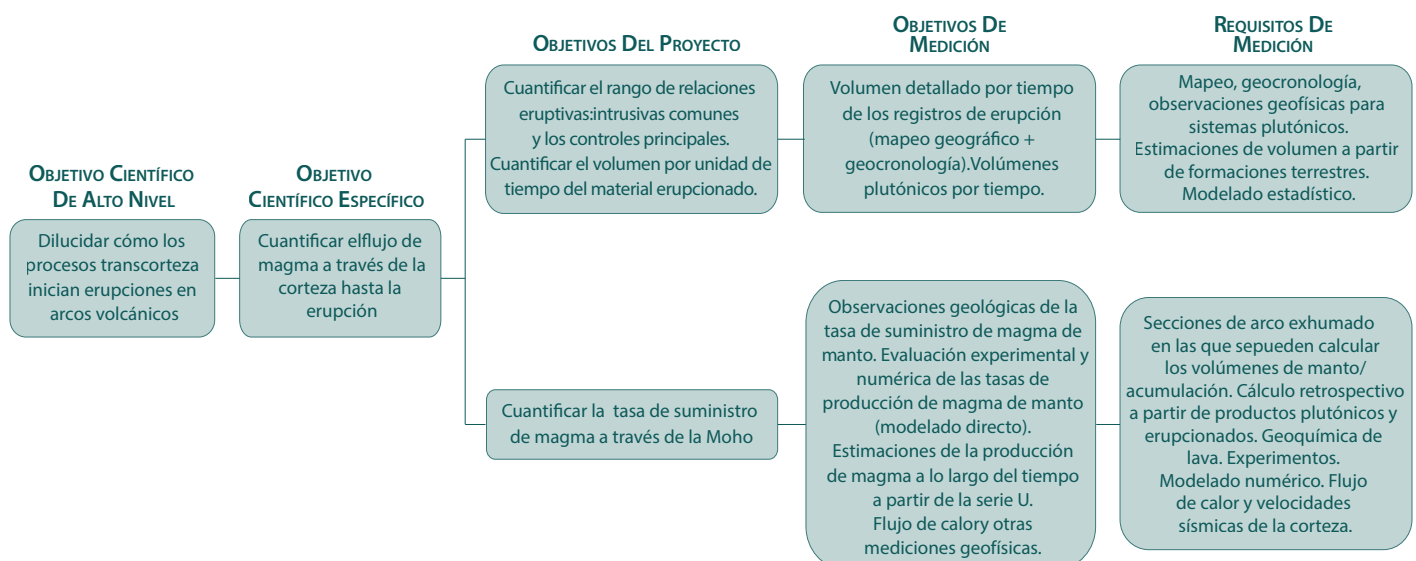
Además, los estudios de modelado y los experimentos analógicos que representan una amplia gama de escalas de tiempo limitarían

los efectos de diferentes reologías de corteza y magma y la dinámica de la evolución mecánica y térmica. Cabe destacar que se trata de un conjunto de hipótesis oportunista, dependiendo de la naturaleza de la actividad en las regiones objetivo durante el periodo de despliegue en el caso de desencadenantes externos de medio a corto alcance. Sin embargo, dado que se basa en las mismas observaciones necesarias para abordar los **conjuntos de hipótesis A y B**, requiere un mínimo esfuerzo de observación adicional al tiempo que proporciona vínculos potenciales clave con temas intersectoriales y objetivos científicos de FEC y L&S.

## TRAZABILIDAD DE LAS PREGUNTAS CIENTÍFICAS A TRAVÉS DE ACTIVIDADES PRÁCTICAS PARA ABORDAR HIPÓTESIS

El grupo de trabajo de MDE de SZ4D utilizó una *matriz de trazabilidad* para describir cómo se probarán los tres conjuntos de hipótesis. La matriz de trazabilidad proporciona un marco lógico para relacionar objetivos científicos, objetivos de proyectos, mediciones específicas y productos

**Figura MDE-3.** Ejemplo de la matriz de trazabilidad que muestra cómo los objetivos científicos pueden relacionarse con mediciones específicas de una variedad de disciplinas.



de datos. Este enfoque es útil para identificar vínculos entre las hipótesis principales de MDE. La matriz de trazabilidad también proporciona una forma eficiente de identificar dónde deben integrarse los conjuntos de datos de diferentes disciplinas. La **Figura MDE-3** proporciona un ejemplo de la *matriz de trazabilidad* de cómo se puede utilizar para conectar los objetivos científicos con la recopilación de datos.

## EXPERIMENTOS TEÓRICOS: ESFUERZOS INSTRUMENTALES, DE DETECCIÓN REMOTA Y GEOLÓGICOS

Los objetivos científicos y las mediciones definidas por la *matriz de trazabilidad* nos permiten desarrollar un conjunto de experimentos teóricos que implican redes instrumentales y de observaciones de detección remota destinadas a abordar las hipótesis clave de MDE. Las observaciones necesarias para abordar el **conjunto de hipótesis A**, como  $\text{CO}_2/\text{SO}_2$  en las emisiones de gas volcánico y el número y la tasa de eventos sísmicos y ubicaciones, se pueden recopilar con conjuntos más pequeños de instrumentos (**redes de sensores de volcanes, Figura MDE-4A**) y, por lo tanto, son factibles en un mayor número de sistemas. Por lo tanto, por ejemplo, una relación hipotética entre la eficiencia de desgasificación y la intensidad de la erupción puede ser el objetivo con despliegues de instrumentos dispersos (p. ej., sismómetros, sensores acústicos, sensores multigas, espectrómetros de absorción óptica diferencial [DOAS], receptores del Sistema Global de Navegación por Satélite [GNSS]), y estudios geoquímicos y geológicos de productos eruptivos recientes, junto con un programa de **detección remota de volcanes**, en un gran número de sistemas que probablemente entren en erupción en la próxima década. Junto con estas actividades, las **redes instrumentales de respuesta rápida ante volcanes** permitirán la flexibilidad de implementar instrumentación y realizar muestreos geológicos en volcanes

que hagan erupción o muestren desequilibrio y tengan el potencial de abordar preguntas científicas.

Por el contrario, las observaciones necesarias para abordar el **conjunto de hipótesis B** incluyen imágenes geofísicas de alta resolución de sistemas magmáticos transcorticales, mapeo/muestreo detallado y análisis geoquímico de rocas erupcionadas en el pasado, y una comprensión detallada del estado del régimen de estrés, el espesor y la madurez térmica de la corteza para sistemas que se forman en respuesta a una gama de tasas de suministro del magma de manto (Katz et al., 2022). Por lo tanto, las pruebas del **conjunto de hipótesis B** provendrán de observaciones detalladas sobre el volumen y la distribución de la acumulación de magma, junto con un registro completo de las frecuencias y volúmenes de erupción del registro geológico (consulte **Sistemas exhumados y sus registros eruptivos pasados**).

Este desafiante conjunto de observaciones requiere redes instrumentales densas que solo serán factibles de implementar en unos pocos sistemas cuidadosamente elegidos (**sensores de imágenes de volcanes, Figura MDE-4B**). Las observaciones de detección remota de volcanes y el modelado de, por ejemplo, la deformación también pueden ayudar a limitar la distribución y el volumen de acumulación de magma.

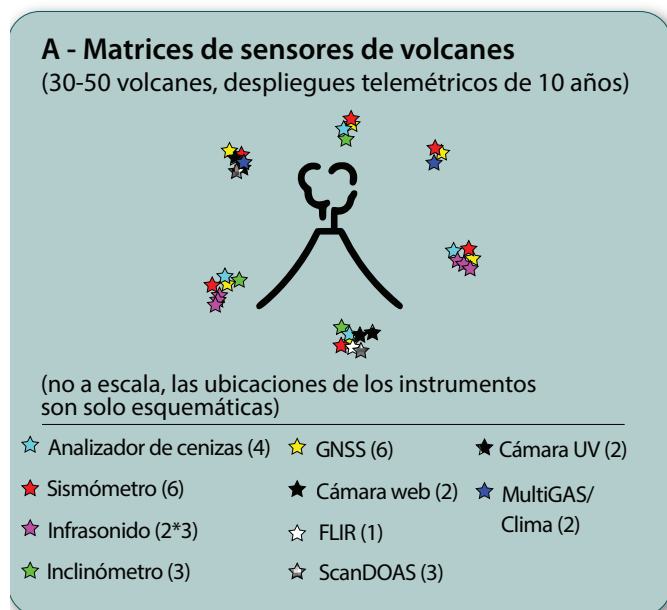
En conjunto, las redes de sensores de volcanes, los sensores de imágenes de volcanes, las redes de respuesta rápida y las observaciones de detección remota comprenden la red instrumental **VolcArray** completa necesaria para abordar los tres conjuntos principales de hipótesis (**Figura MDE-4**) en combinación con el trabajo geológico, experimental y de modelado.

### A - Redes de sensores de volcanes

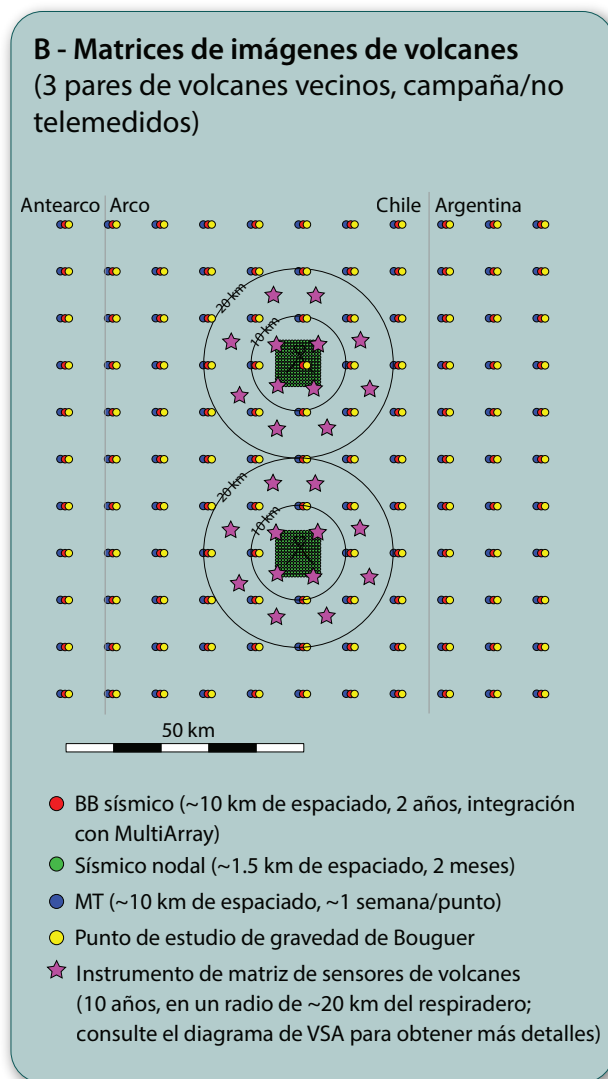
#### Hipótesis dirigidas: A y C

##### Experimentos propuestos

Investigar algunas hipótesis requiere instrumentos relativamente escasos para la caracterización de los desequilibrios volcánicos durante varias fases del ciclo de erupción (**redes**



**Figura MDE-4.** Esquema de VolcArray. Panel izquierdo: Esquema de la red de sensores de volcanes (VSA). Los datos recopilados por la red instrumental se complementarán con observaciones de detección remota, despliegues de respuesta rápida y un estudio petrológico de productos eruptivos producidos durante el período de despliegue. Panel derecho: Esquema del sensor de imágenes de volcanes (VIA). Los datos recopilados por el sensor se complementarán con observaciones de detección remota, un estudio en profundidad de productos de erupción pasados y cuantificación del suministro del magma de manto. Se debe tener en cuenta que las VIA se implementarán conjuntamente en un pequeño número de sistemas que alojan VSA.



**de sensores de volcanes**), en combinación con estudios geoquímicos y geológicos de productos eruptivos del período de observación. Dichos despliegues son factibles en un número relativamente grande de sistemas, que probablemente que erupcionen en la próxima década. Los objetivos generales de estos experimentos son comprender cómo la composición del gas y el magma se relaciona con los precursores de la erupción, los tiempos de actividad previa y las intensidades de la erupción.

**ACTIVIDAD 1 |** Instrumentar y detectar de forma remota un conjunto de arcos volcánicos con actividad (es decir, que actualmente exhiben sismos, deformaciones o desgasificación) o potencialmente activos con equipos de monitorización visual, térmica, de gas, sísmica/

acústica y geodésica para observar la evolución de los datos recopilados casi en tiempo real, desde el estado de fondo hasta la actividad previa y la sinerupción.

**ACTIVIDAD 2 |** En los mismos volcanes, realizar un examen petrológico de rocas erupcionadas para determinar la causa (p. ej., rejuvenecimiento máfico) y, utilizando cronometría de difusión, el momento del evento de inicio de la erupción.

**ACTIVIDAD 3 |** Comparar los resultados de ambos conjuntos de estudios (partes 1 y 2), además de cualquier estudio sísmico regional del grupo de trabajo de FEC, para determinar si existe la correlación hipotética entre las señales de gas y geofísicas registradas y la sincronización petrológica de erupción-eventos precursores.

**ACTIVIDAD 4** | Comparar sistemáticamente las determinaciones petrológicas/texturales y geofísicas de la profundidad de almacenamiento del magma y la velocidad de ascenso para cada evento con la velocidad de extrusión y los estilos eruptivos monitorizados en el centro de emisión.

**ACTIVIDAD 5** | Desarrollar modelos físicos que puedan asimilar estos diferentes conjuntos de datos (de las actividades 1 a 4) para investigar los procesos de transporte de magma para pronosticar erupciones. Las observaciones de las partes 1 a 4 también proporcionarán la oportunidad de investigar los efectos de los desencadenantes externos (**conjunto de hipótesis C**) en procesos en múltiples plazos en sistemas magmáticos e hidrotérmicos.

**ALCANCE** | Proponemos implementar un gran número (30–50) de **redes de sensores de volcanes** para observar volcanes en diferentes etapas de su ciclo de erupción. Los volcanes elegidos también deben tener diferentes químicas magma de recarga (incluida la máfica) y diferentes estilos eruptivos. El número propuesto de volcanes objetivo se basa en los siguientes análisis. En primer lugar, si hubiéramos implementado **redes de sensores de volcanes** en los 99 volcanes de todo el mundo que se estaban desgasificando (Carn et al., 2017) o deformando (Furtney et al., 2018; Reath et al., 2020) durante un periodo de 10 años entre 2000 y 2020, habríamos observado ~30 ciclos de erupción completos y caracterizaríamos múltiples erupciones que siguieron a periodos de reposo de uno a ocho años y tenían un índice de explosividad volcánica (VEI; Newhall y Self, 1982) de 0-4 (**Figuras MDE-5 y MDE-6A, B**). Aunque la probabilidad de capturar una erupción VEI 4+ durante un despliegue de 10 años es baja, si se produjera dicha erupción, **las redes instrumentales de respuesta rápida** permitirían una implementación rápida a medida que evoluciona la erupción. Con entre 30 y 50 **redes de sensores** enfocadas regionalmente en América, estimamos una probabilidad de  $\geq 0,8$  en la "captura y caracterización" de aproximadamente diez erupciones en un período de 10 años (**Figura MDE-6**). Dado el gran número de

objetivos propuestos, las **redes de sensores de volcanes** podrían implementarse de forma incremental, centrándose primero en unos pocos volcanes en la proximidad geográfica a los sistemas elegidos para las **sensores de imágenes de volcanes** y expandiéndose progresivamente para cubrir los entre 30 y 50 volcanes objetivo.

*Resultados esperados*

1. Esperamos caracterizar directamente la relación entre los procesos magmáticos (p. ej., rejuvenecimiento máfico) y las emisiones de gas asociadas y/o las señales geofísicas (p. ej., deformación). Esto permitiría la interpretación en tiempo real de las señales de gas volcánico durante los futuros desequilibrios volcánicos, mejorando de forma crítica las capacidades de previsión.
2. Esperamos establecer una correlación entre el rejuvenecimiento máfico como desencadenante de las erupciones y los plazos característicos en los que inicia las erupciones.
3. Esperamos identificar los umbrales críticos en la eficiencia de desgasificación y la tasa de ascenso magma que corresponden a diferentes comportamientos eruptivos.
4. Esperamos que cualquier correlación entre la sismicidad local y regional, la deformación y los cambios en la desgasificación y la sismicidad volcánica permita la diferenciación entre los mecanismos de desencadenamiento externos (cambios de estrés en los sistemas magmáticos) e internos (rejuvenecimiento máfico o cambios en la presión magmática).

#### Sensores de imágenes de volcanes

**Hipótesis dirigidas: B y C**

*Experimentos propuestos*

Investigar algunas hipótesis requiere red instrumental densa para la obtención de imágenes geofísicas de alta resolución (sensores de imágenes de volcanes), combinadas con

estudios detallados de mapeo y muestreo. Los despliegues solo son factibles en un puñado de volcanes seleccionados que representan una posible gama de tasas de suministro de magma de manto. Los objetivos generales de estos experimentos son cuantificar las tasas de suministro de magma desde el manto, la geometría del sistema magmático transcortical y las historias eruptivas. Por lo tanto, estos sistemas no necesitan entrar en erupción durante el despliegue del sensor de imágenes de volcanes, aunque también se implementarán redes de sensores de volcanes en volcanes dirigidos a imágenes para estudios oportunistas en caso de erupción o desequilibrio volcánico.

**ACTIVIDAD 1** | Recopilar datos que proporcionen restricciones en la tasa de suministro del magma de manto de las campañas de flujo de  $^3\text{He}$  y  $\text{CO}_2$  y el flujo de calor.

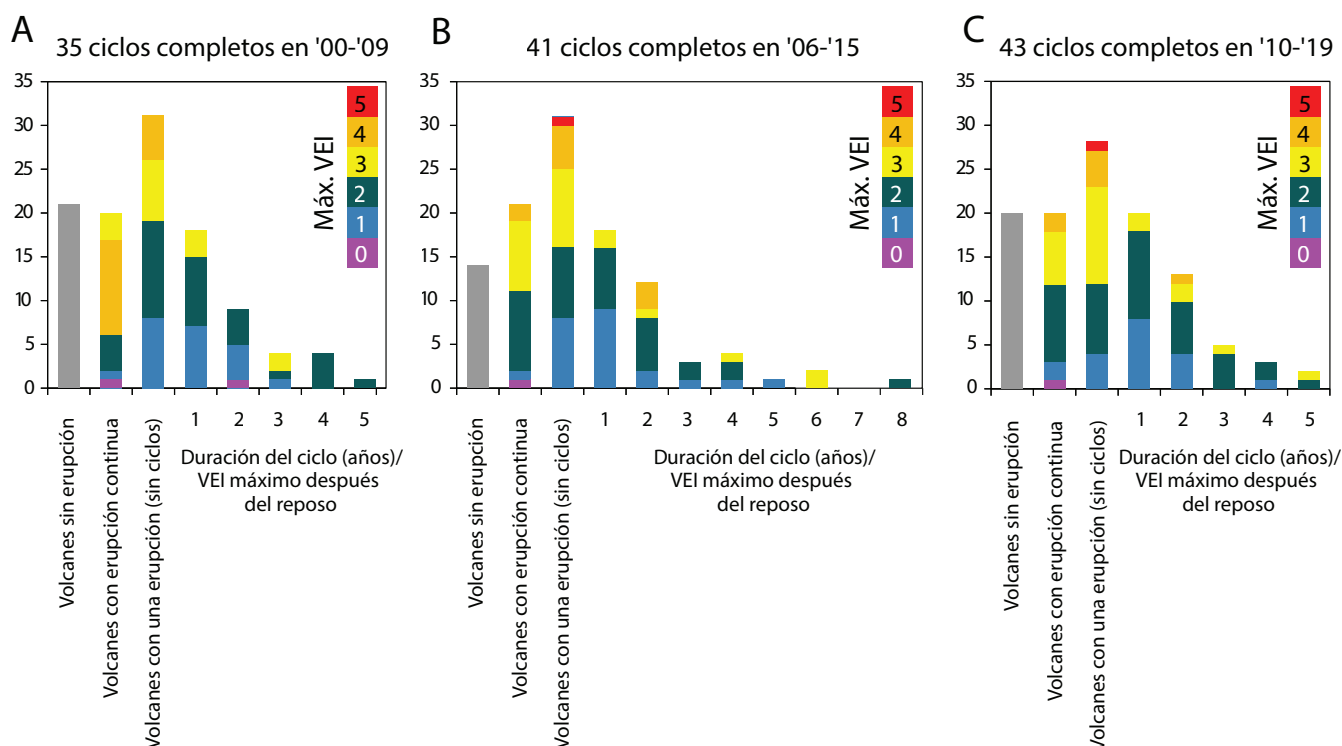
**ACTIVIDAD 2** | Realizar estudios de mapeo ampliados y muestreo de productos eruptivos para estimar volúmenes, historial de erupciones y explosividad, e identificar composiciones de fusión parental mediante estudios geocronológicos, geoquímicos y petrológicos.

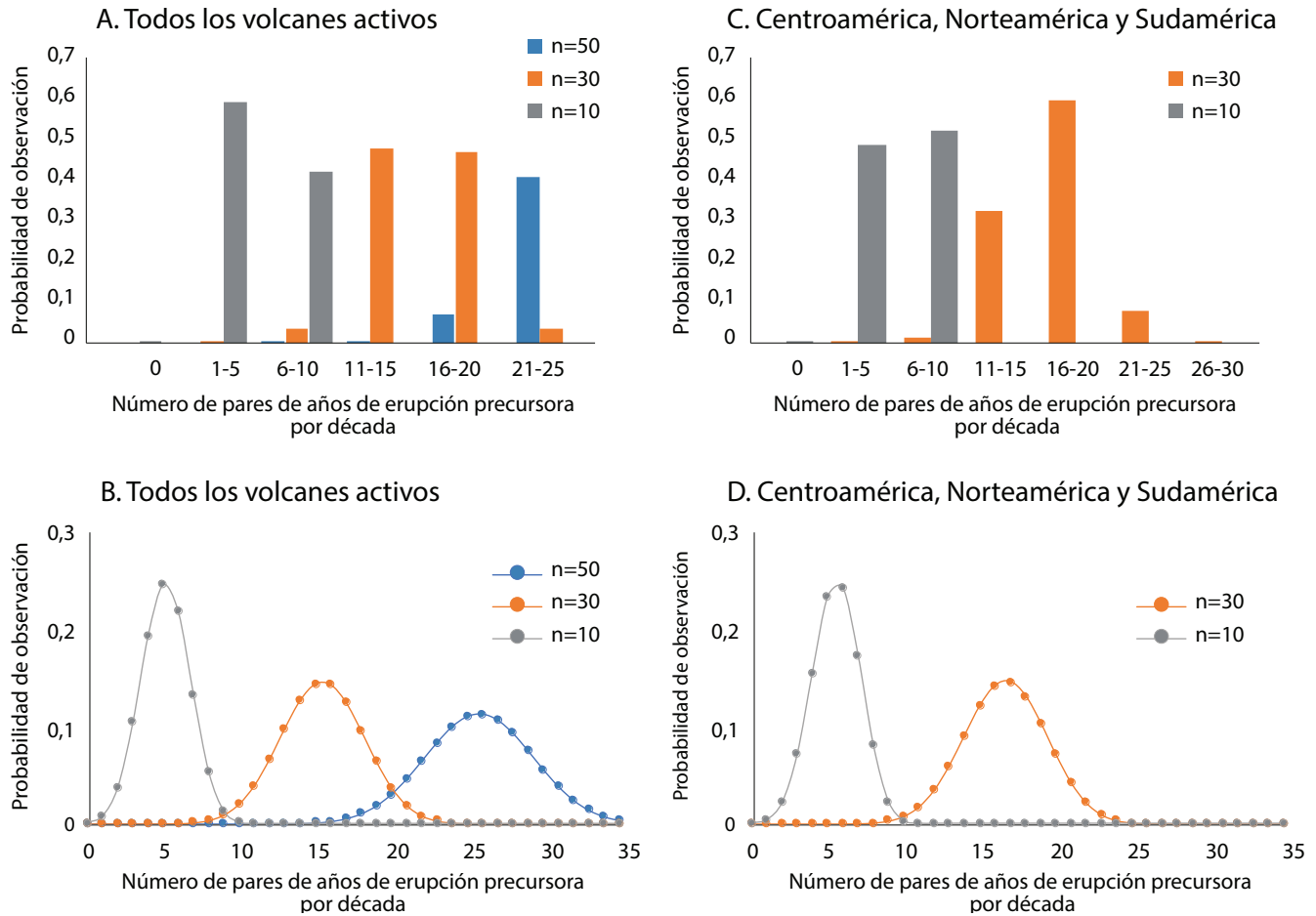
**ACTIVIDAD 3** | Realizar estudios de geotermobarometría y texturales de productos eruptivos para limitar la presión, la temperatura y las propiedades físicas del magma, incluido el momento de recarga del magma.

**ACTIVIDAD 4** | Recopilar imágenes del sistema magma y de las propiedades de la corteza junto con observaciones densas para tomografía sísmica, magnetotelúrica (MT) y gravimetría.

**Figura MDE-5.** “Mejor escenario” para observaciones de erupción con redes de sensores de volcanes. Cada gráfico caracteriza la actividad eruptiva en estos 99 volcanes dentro de un período de 10 años (A) 2000-2009; (B) 2006-2015; (C) 2010-2019), codificado por el VEI máximo y el período de reposo (duración del ciclo).

Conjuntos de observación de 10 años de monitorización de  
99 volcanes con desgasificación/deformación activa en todo el mundo (Carn/Furtney)





**Figura MDE-6.** Probabilidades calculadas para  $n$  = redes de sensores de volcanes de 10, 30 y 50 observando ciclos de erupción para los 99 volcanes activos identificados, y  $n$  = 10 y 30 para un subconjunto de estos de América del Norte, del Sur y Central (36 volcanes). Las probabilidades se determinaron utilizando el comportamiento de erupción observado para los 99 volcanes activos en Carn et al. (2017) y Furtney et al. (2018) en función de la década 2000-2009. Un par de años de erupción precursora se define como un año sin erupción seguido de un año con al menos una erupción durante esta década (de manera que tanto los precursores como la erupción se observarían con las redes de sensores de volcanes). Algunos volcanes muestran más de un ciclo de erupción en esta década. Los cálculos utilizan el teorema binomial para redes instrumentales de observación de  $n$  = 10, 30 y 50 volcanes. Probabilidades para todos los volcanes activos determinadas como  $P = (\text{número de volcanes observados que tuvieron } \geq 1 \text{ par de años de erupción precursora en la década 2000-2009}) / (\text{número total de volcanes})$  para todos los volcanes, o para el subconjunto de volcanes en América del Norte, del Sur y Central. Se trata de 51/99 volcanes para todo el conjunto de volcanes activos y 25/36 volcanes para Norteamérica, Sudamérica y Centroamérica. Los resultados se muestran individualmente para cada número de ciclos de erupción en (B) y (D) y se agrupan en grupos de cinco (A) y (C).

**ACTIVIDAD 5 |** Recopilar mediciones geodésicas terrestres y satelitales (p. ej., INSAR) de deformación inducida por el sistema magma, así como cambios temporales en la gravedad. Actividad 6. Investigar los cambios en la velocidad sísmica y la ubicación de los eventos. Los métodos de obtención de imágenes geofísicas deben diseñarse para observar magmas erupcionables y volátiles exseltos. Esto requerirá inversiones en instrumentos en estructuras volcánicas cercanas que se conecten con estrategias propuestas por los grupos de trabajo de FEC y L&S. Las observaciones de las partes 2 a 3 también proporcionarán la oportunidad de investigar los efectos de los desencadenantes de la erupción externa (p. ej., descarga glacial en el **conjunto de hipótesis C**) en los procesos a escala de tiempo prolongada.

**ALCANCE |** Será importante desarrollar experimentos en al menos tres arcos isleños diferentes: aquellos relacionados con tasas de suministro de magma de manto lentas, medias y rápidas. Además, dirigirse a pares proximales de estratovolcanes y centros monogenéticos cercanos permitirá examinar las variaciones en la arquitectura de la corteza, el estrés o la composición a parámetros de subducción constantes. Dicha estrategia podría llevar a dirigirse a un par de volcanes vecinos en tres arcos diferentes.

#### *Resultados esperados*

1. Esperamos limitar cuantitativamente y contrastar la tasa de suministro actual y promediada en el tiempo de magma en el sistema volcánico transcortical, uno de los “santos giales” de la volcanología, a través de mediciones multidisciplinarias.
2. La imagen geofísica detallada de la subsuperficie debajo de los volcanes debe revelar la arquitectura del sistema magmático, las fracciones de fusión en diferentes regiones y cuán centralizada está en relación con la estructura.
3. Probaremos las hipótesis relativas a la relación entre la tasa de suministro de

magma y la evolución en profundidad de los depósitos de magma.

4. Probaremos la relación entre el tiempo de residencia de la corteza del magma y la intensidad de la erupción.

## **Redes instrumentales de respuesta rápida ante volcanes**

### **Hipótesis dirigidas: A, B y C**

Dado el objetivo de capturar los fenómenos desencadenantes externos y relacionados con erupciones inherentes a los **conjuntos de hipótesis A y C**, un componente del plan de implementación de MDE implicará una respuesta rápida a erupciones o episodios de desequilibrio volcánico en casos en los que exista la posibilidad de realizar observaciones de comportamiento precursor y sinérgico, especialmente para erupciones de VEI 4+ o en respuesta a posibles desencadenantes externos importantes (terremotos grandes y/o deslizamientos o caídas del sector). Por lo tanto, prevemos mantener reservas estratégicas de **redes instrumentales de respuesta rápida**, idealmente ubicadas en regiones objetivo. También planeamos implementar un programa de detección remota de rutina (consulte la sección **Programa de detección remota** a continuación) para detectar gases anómalos, emisiones térmicas y/o deformaciones para identificar objetivos candidatos, y para organizar protocolos para el análisis y muestreo de cenizas/lava de respuesta rápida. Los enfoques para el desarrollo de las **redes instrumentales de respuesta rápida** se informarán mediante los resultados de la iniciativa CONVERSE (Fischer et al., 2021).

### Programa de detección remota

#### Hipótesis dirigidas: A, B y C

Los conjuntos de hipótesis A, B y C requieren un programa coordinado de detección remota continua y oportunista, además de observaciones en tierra. Observaciones satelitales rutinarias, como los de la próxima misión de radar de apertura sintética (INSAR) de la NASA-ISRO (INSAR, 2018), el instrumento de monitorización troposférica (TROPOMI) a bordo del satélite Sentinel-5 de Copernicus (Theys et al., 2019), y la *misión planificada del espectrómetro de imágenes de Biología y Geología de Superficie (SBG)*, así como las observaciones de anomalías térmicas de sensores de transmisión por satélite como el espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) a bordo de los satélites Terra y Aqua (p. ej., Girona et al. 2021), proporcionará información crítica sobre el estado de deformación y desgasificación en todos los volcanes de las regiones objetivo y ayudará a identificar de forma temprana los objetivos de respuesta rápida y los posibles desencadenantes externos, como las inestabilidades en los flancos (p. ej., Schaefer et al., 2017). Los instrumentos adicionales transportados por el espacio, como el instrumento EMIT en la Estación Espacial Internacional que mide la composición mineral del polvo soplado por el viento en regiones áridas, y los prototipos alojados en Cubesat del Sistema de Observación Hiperespectral de Química Atmosférica Nanosat (NACHOS) también pueden proporcionar observaciones útiles hacia los objetivos de MDE. Dependiendo de las regiones objetivo seleccionadas, MDE puede desarrollar asociaciones con uno o más *supersitios permanentes de peligros geológicos* para garantizar la adquisición y el procesamiento regulares de datos satelitales críticos. Además, se pueden utilizar observaciones de campaña u oportunistas en el aire (p. ej., LiDAR, aeromagnetéticas, estudios de aerogravedad) y basadas en drones para complementar las observaciones en tierra en casos en los que el acceso seguro a la cumbre es limitado.

### EXPERIMENTOS TEÓRICOS: SISTEMAS MAGMÁTICOS EXHUMADOS

En paralelo con los despliegues de instrumentos y los esfuerzos de campo relacionados con productos eruptivos (**Sección III**), y basándose en actividades científicas inmediatas (consulte la **Sección VII**), un espectro de trabajo en sistemas magmáticos exhumados será fundamental para probar las hipótesis de MDE.

#### Sistemas exhumados y sus registros eruptivos pasados

##### Hipótesis dirigidas: B

##### Experimentos propuestos

Las rocas plutónicas y los productos de erupciones pasadas en **sistemas exhumados** pueden utilizarse para limitar las tasas de suministro de magma desde el manto hasta la corteza, las condiciones de almacenamiento de magma (p. ej., profundidades, temperaturas, contenido volátil), la distribución espacial y los volúmenes de magma, y las escalas de tiempo de los procesos magmáticos en la corteza. Las localidades plutónicas permiten probar hipótesis sobre cómo estas variables influyen en la evolución de los sistemas magmáticos subsuperficiales que, a su vez, generan peligros en la superficie.

**ACTIVIDAD 1** | Combinar la geocronología, geovelocimetría, experimentos de laboratorio y modelos para explorar procesos en una amplia gama de escalas de tiempo de acoplamiento plutónico (millones de años a minutos, p. ej., Glazner et al. 2004) y tasas (p. ej., suministro de manto y tasas de ascenso dentro de la corteza, longevidad y periodicidad de estados magmáticos erupcionables e no erupcionables).

**ACTIVIDAD 2** | Utilizar la geobarometría para establecer la estructura y la distribución de las fases dentro de los sistemas magmáticos, y el magma dentro de la corteza a lo largo del tiempo.

**ACTIVIDAD 3 |** Realizar análisis de geoquímica (hiper)densos a lo largo de la estratigrafía de plutones y secuencias eruptivas pasadas, así como realizar experimentos sobre composiciones naturales, para evaluar la evolución de propiedades magmáticas críticas (p. ej., contenido volátil) y relaciones entre eventos magmáticos y erupciones (p. ej., recarga).

**ACTIVIDAD 4 |** Evaluar la información estructural a escala de micro (cristal/poro) a macro (campo) conservada en sistemas intrusivos para estimar los procesos relacionados con el movimiento del magma (p. ej., desplazamiento, estancamiento, percolación, extracción de masas y reposición).

**ACTIVIDAD 5 |** Sintetizar estos resultados para limitar la estructura térmica de la corteza en el tiempo y el espacio, y la velocidad y la eficiencia de los procesos internos (segregación de fases y transporte de magmas a partes más superficiales de la corteza). Estas mediciones se aplicarán en modelos que aborden la erupabilidad de los magmas y el tiempo de incubación para el crecimiento del depósito, que también incorporarán mediciones geofísicas de sistemas activos (consulte la Sección III). También serán importantes para identificar los sistemas volcánicos y plutónicos que están genéticamente relacionados, ayudando a identificar los procesos magmáticos que provocan erupciones frente a aquellos que están desacoplados de ellas.

**ALCANCE |** Los diferentes plutones expuestos proporcionan acceso a distintos niveles dentro de la corteza (de 0 a 60 km), arquitecturas (arcos oceánicos frente a continentales) y regímenes tectónicos inferidos (compresivos frente a extensionales). Se han estudiado diferentes sitios con mayor o menor detalle y con diferentes métodos. Dada la variabilidad en las características de los sistemas exhumados, un enfoque común puede no ser apropiado para cada sitio (como para los volcanes activos). Más bien, cada centro puede tener necesidades de investigación independientes con el objetivo de comprender la variación de composición magmática con profundidad, tiempos de almacenamiento y tasas de

suministro de magma. La escala abarcará desde los plutones individuales hasta una sección transversal transcortical de arcos exhumados. El número y la diversidad de centros deben seleccionarse en función de su utilidad en las hipótesis de prueba, y las iniciativas propuestas deben crear conjuntos de datos existentes.

#### *Resultados esperados*

Esperamos caracterizar la historia magmática (p. ej., composición, profundidades de almacenamiento, tiempos de tránsito) y el estado de la corteza a lo largo del tiempo y su relación con la erupabilidad del magma, la periodicidad de las erupciones y los desencadenantes magmáticos de las erupciones. La comparación de esta historia magmática a escala de arco con historias a largo plazo de erosión y evolución del paisaje será fundamental para evaluar preguntas interdisciplinarias sobre cómo la estructura del arco se relaciona con la topografía de la superficie y la generación de sedimentos.

## EXPERIMENTOS TEÓRICOS: ESTUDIOS DE MODELADO NUMÉRICO Y DE LABORATORIO

### Estudios experimentales de laboratorio

#### Hipótesis dirigidas: A, B y C

#### *Experimentos de laboratorio propuestos*

**ACTIVIDAD 1 - Volátiles |** Realizar nuevos conjuntos de experimentos de solubilidad y difusividad volátiles en condiciones magmáticas. Aunque las leyes de solubilidad para  $H_2O$  están bien caracterizadas, la solubilidad de  $CO_2$  es poco conocida en condiciones de cortezas bajas. El comportamiento del S aún está muy poco limitado debido a las complejas relaciones de partición que existen en múltiples especies de gas y fusión como función de P, T y estado de oxidación. La pérdida/ganancia difusiva de volátiles de inclusiones de fusión en varias fases minerales es importante para comprender la fidelidad de inclusiones de fusión para estimaciones

de presión y su uso como geovelocímetros (p. ej., tasas de ascenso). También se necesita más trabajo para comprender completamente el comportamiento de los halógenos y gases nobles y el efecto del flujo de gas (p. ej., flujo de  $\text{CO}_2$ ) en los registros de inclusión de fusión y las emisiones de gas.

**ACTIVIDAD 2 - Difusión** | Determinar con precisión los plazos de los procesos magmáticos, como la tasa de ascenso, el tiempo de residencia y la sincronización de la mezcla a través de nuevos experimentos para desarrollar leyes de difusión precisas en función de P-T-X (y, de manera importante,  $\text{H}_2\text{O}$ ).

**ACTIVIDAD 3 - Geobarómetros** | Realizar nuevos conjuntos de experimentos de equilibrio de fases dirigidos a composiciones específicas de fusión de arco y espacio P-T transcortical para aumentar la utilidad de los geobarómetros. Para comprender la velocidad, la trayectoria y la distribución del magma a través de la corteza, es esencial determinar de forma fiable el historial de crecimiento de la presión de los cristales. Los geobarómetros para sistemas magmáticos han estado mejorando a lo largo de los cincuenta años, pero siguen siendo inexactos cuando se aplican a sistemas magmáticos de corteza. Complementaremos estos experimentos con nuevos barómetros de inclusión de fluidos que aumentarán significativamente la precisión de las restricciones de presión.

**ACTIVIDAD 4 - Experimentos en física de rocas en materiales reales y análogos** | Explorar los efectos de la reología líquida de fase sólida y multifásica en el movimiento del magma, la alteración rupestre y los cambios en la fuerza mecánica, el crecimiento del plutón y la eficiencia de desgasificación.

**ACTIVIDAD 5 - Mediciones de velocidad sísmica y atenuación y conductividad eléctrica** | Realizar experimentos necesarios para interpretar imágenes geofísicas como una función de contenido de fusión y burbujas para diferentes composiciones, fracciones y geometrías. Correlacionar las propiedades físicas

del magma con la evolución de la estructura de la masa en cuatro dimensiones a varias escalas temporales y espaciales para permitir la extrapolación de modelos reológicos calibrados en laboratorio a escalas geológicas que son, en muchas órdenes de magnitud, mayores que en el laboratorio. La radiación de sincrotrón y neutrones ha surgido como herramientas potentes para caracterizar la distribución tridimensional resuelta en el tiempo de las fases minerales, los estados de estrés y la orientación de los granos en los materiales (p. ej., Zhu et al., 2011; 2016). Estos avances tecnológicos proporcionan una oportunidad tremenda para desarrollar nuevas metodologías experimentales para que las propiedades y microestructuras en evolución puedan cuantificarse en funcionamiento.

### *Resultados esperados*

1. Esperamos mejorar los modelos de desgasificación actuales incorporando leyes de mejor solubilidad y partición en sistemas multicomponente. Esto es fundamental para interpretar las composiciones de gas volcánico medidas en términos de procesos magmáticos.
2. Esperamos mejorar nuestra capacidad para caracterizar eventos magmáticos (p. ej., eventos de mezcla o recarga) y cuantificar la duración de la residencia en los depósitos y la tasa de ascenso.
3. Esperamos mejorar significativamente nuestra comprensión de las profundidades en las que residen los magmas y reconstruir mejor sus historias de tiempo de presión.
4. Los experimentos de física en roca mejorarían la comprensión del acoplamiento mecánico entre los magmas y su huésped durante el transporte y la acumulación y proporcionarían modelos más precisos para relacionar las propiedades elásticas y eléctricas de los magmas multifase para las inversiones geofísicas.

## Estudios de modelado (MCS)

### Hipótesis dirigidas: A, B y C

Los modelos numéricos integran las observaciones en un marco que permite probar hipótesis. Los modelos representan una poderosa herramienta para explorar la física subyacente a los procesos magmáticos, hacer previsiones de erupción y conectar los procesos en sistemas magmáticos activos con el registro geológico. El modelado desempeñará un papel importante en las hipótesis de prueba (consulte la **Sección III**), en el desarrollo del diseño de VolcArray, en la interpretación de los datos de observación y en la previsión de erupciones (**Sección IV**) y en la ejecución de actividades científicas inmediatas antes del despliegue de la red instrumental (**Sección V**).

El taller de modelado colaborativo para la subducción de sistemas volcánicos tuvo lugar en línea desde septiembre de 2020 hasta mayo de 2021, y produjo un informe (Gonnermann y Anderson, 2021) que abarca:

1. Desafíos y oportunidades para el modelado y la colaboración de volcán de zona de subducción, y
2. Una visión de cómo un modelado colaborativo impulsaría mejor los objetivos científicos.

Esta sección resume los resultados clave del informe del taller en el contexto de los objetivos de MDE dentro de tres vías principales.

**El desarrollo de modelos físicos/numéricos** implica tanto el estudio de nuevos procesos físicos como la implementación y verificación/validación de modelos. Ejemplos de procesos poco comprendidos que podrían abordarse incluyen la separación de fases de no equilibrio y el transporte reactivo en depósitos de magma, la dinámica del ascenso de dique, los controles sobre la formación de depósitos de magma y las ubicaciones/geometría de centro de emisión eruptivo, las interacciones de agua subterránea de magma y la mecánica del transporte de fusión profunda en la corteza. Para los problemas

en los que existe un amplio acuerdo sobre las necesidades de modelado y los procesos físicos relevantes, una instalación de MCS podría apoyar el desarrollo de nuevos códigos centrados (código abierto) y la actualización de códigos antiguos. Ejemplos de problemas que podrían beneficiarse de códigos comunitarios accesibles y del desarrollo de modelos de código abierto incluyen el flujo de conductos inestables multifase; la deformación de tierra asociada con depósitos de magma y la reología de roca heterogénea, elástica y viscoelástica; la conducción térmica multicomponente; y la termodinámica de equilibrio de magmas multifase. Un MCS de volcán también puede organizar la verificación y validación de modelos para establecer estándares de reproducibilidad y promover prácticas de modelado colaborativo. El desarrollo de modelos podría apoyarse a través de grupos de trabajo comunitarios temáticos (CWG) para reunir a investigadores, modeladores, experimentalistas y observacionalistas, así como a aquellos de otros campos como la informática o las matemáticas aplicadas, para trabajar en problemas comunes, produciendo modelos y resultados a través de talleres y propuestas colaborativas.

**Inversión y asimilación de datos.** Los métodos inversos proporcionan el vínculo crítico entre los datos y los modelos. Las técnicas varían ampliamente, desde enfoques de optimización simples hasta marcos de inferencia bayesianos sofisticados. Un MCS podría desempeñar un papel importante en la organización de diferentes comunidades de investigación para desarrollar marcos para sintetizar datos diversos, inversiones conjuntas y cuantificación de incertidumbre. Los tipos de datos con sensibilidad complementaria a la estructura y los procesos incluyen deformación, sísmica, tomografía de onda sísmica, electromagnética, gravedad, geoquímica y petrología, y emisiones de gas y térmicas.

Los métodos inversos y la asimilación de datos son campos de rápida evolución tras la explosión de nuevos métodos estadísticos en las ciencias de datos. La detección de

anomalías y el reconocimiento de patrones se han revolucionado mediante técnicas de aprendizaje automático y se han beneficiado enormemente de la cantidad de datos de acceso libre. Un MCS también podría proporcionar un puente entre los investigadores volcánicos, los matemáticos aplicados y los científicos de datos. Estas colaboraciones podrían mejorar el diseño de la red de sensores, reducir la falta de exclusividad heredada de las inversiones y proporcionar marcos de previsión más precisos y basados en la física.

**Formación y desarrollo de capacidades humanas.** Para avanzar en los objetivos científicos basados en hipótesis a través del modelado integrador de sistemas magmático-volcánicos se requiere una masa crítica de geocientíficos que sean expertos en el desarrollo de modelos y en la aplicación de modelos. Un MCS podría servir como conducto programático a este respecto, asegurando a través de talleres y redes (en particular, a través de la estructura CWG) que un creciente grupo de modeladores estará en una posición óptima para colaborar con científicos experimentales y observacionales a través del desarrollo de modelos y el uso de modelos basados en hipótesis. Un MCS también puede proporcionar formación a los investigadores interesados en obtener más información sobre modelos específicos, incluida la utilización de códigos, la implementación de códigos existentes en formatos modernos de código abierto y la física subyacente y las suposiciones detrás de los modelos. Estos esfuerzos están claramente alineados con los objetivos de desarrollo de capacidades, educación y Pertenencia, Accesibilidad, Justicia, Equidad, Diversidad e Inclusividad (BAJEDI) del Grupo de SZ4D BECG.

## EVALUACIÓN DEL SITIO

Los experimentos teóricos de la **Sección III** incluirán todos los aspectos de la VolcArray completa. Se requerirán **sensores de imágenes en un pequeño número (~4–6) de sistemas impulsados por una serie de tasas de suministro de magma de manto y que tengan sistemas magmáticos transcorticales de los que se puedan obtener imágenes e historia volcánicas accesibles**. También es necesario desplegar **redes de sensores de volcanes** en un gran número (~30–50) de arcos volcánicos que muestren desequilibrios magmáticos y tengan antecedentes de erupción frecuente o potencial de erupción a corto plazo, con el potencial de aumento por **las redes instrumentales de respuesta rápida** durante episodios emergentes de desequilibrio. Todos los centros deben ser logísticamente viables (la accesibilidad y los datos abiertos son clave) e implicar una estrecha asociación con los observatorios locales y las instituciones académicas. Las regiones/centros seleccionados también deben encajar bien con las prioridades de FEC y L&S para maximizar el apoyo logístico y permitir actividades científicas intersectoriales.

### Características de ubicación ideal y el inventario de arcos volcánicos de MDE

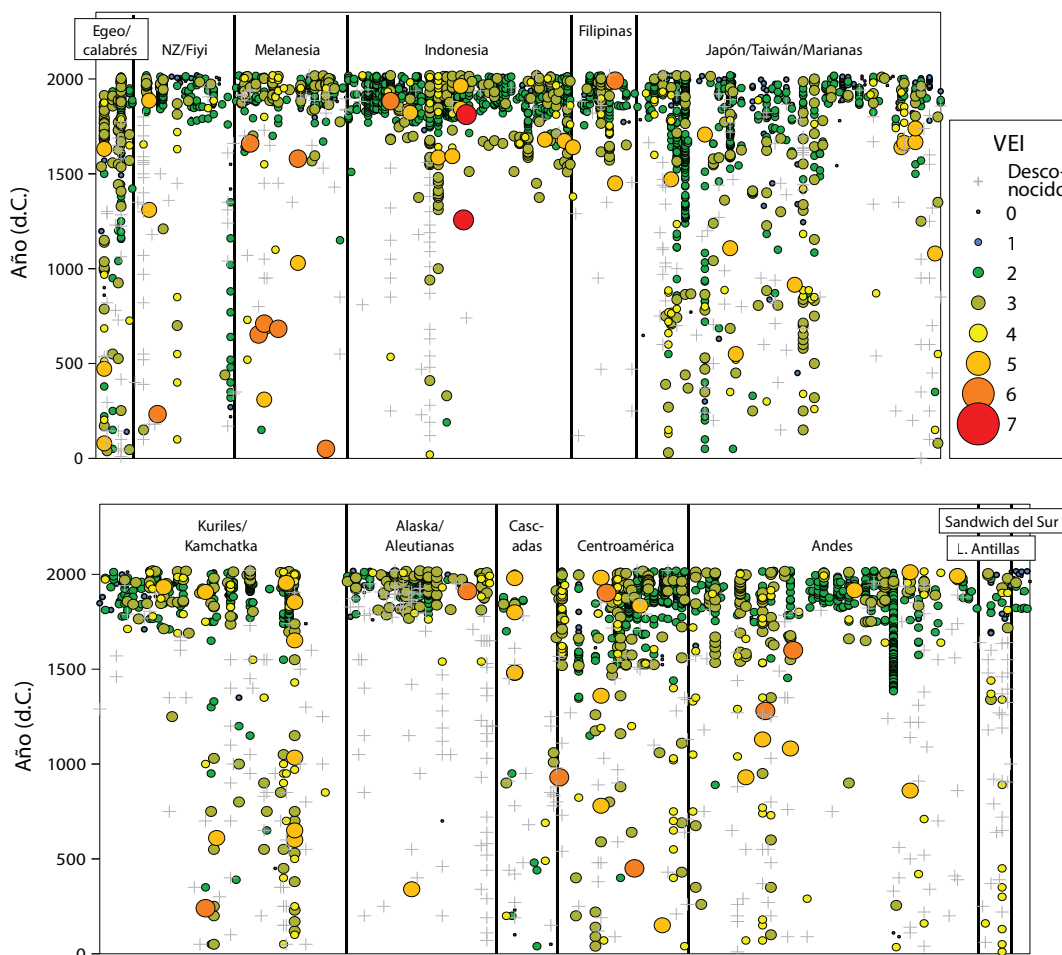
**Las redes de sensores de volcanes** están dirigidas en gran medida a los **conjuntos de hipótesis A y C**, con muchos objetivos diversos (~30–50). Las características de ubicación ideales incluyen:

- Los sistemas “potencialmente activos”, en el sentido de que muestran desequilibrio y/o probabilidad de erupción en las próximas décadas. Las indicaciones de posible actividad pueden incluir si un sistema está emitiendo gas activamente (Carn et al., 2017) o deformándose (Furtney et al., 2018).
- Buen acceso a la cumbre para implementar Multigas y otras unidades de medición de gases (DOAS) todo el año o con campañas de sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS), para la caracterización de series temporales de la química del gas.

- Una diversidad de químicas de magma, desde máficas hasta félsicas. Una proporción significativa de los volcanes objetivo debe ser de composición basáltica para probar hipótesis en cuanto al tiempo de inicio del magma, la recarga máfica y la química del gas.
- Objetivos accesibles, con el fin de implementar y mantener instrumentación de campo cercano y proporcionar opciones de telemetría para la transmisión de datos abierta y casi en tiempo real.
- Un subconjunto de volcanes con una buena probabilidad de erupción varias veces con diferentes intensidades durante el período de observación.
- Sistemas que exhiben una diversidad de estilos e intensidad eruptivos. Idealmente, **las redes de sensores de volcanes** capturarían erupciones de VEI 1 a 4. Esto también puede requerir **redes instrumentales de respuesta rápida** (consulte la **Sección IIIc**).
- Proximidad a terremotos de gran magnitud para probar el desencadenamiento de desequilibrio volcánico y erupción.

**Los sensores de imágenes de volcanes** están dirigidas en gran medida a los **conjuntos de hipótesis B y C**, con un pequeño número (~4–6) de objetivos para estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos intensivos e integrados.

**Figura MDE-7.** Número de erupciones a lo largo del tiempo (últimos ~2000 años) por zona de subducción, codificadas por VEI. Cada columna vertical representa un volcán que entró en erupción en el Holoceno; el ancho de los datos en cada segmento indica, por lo tanto, aproximadamente el número de diferentes volcanes que han estado activos en el Holoceno (datos del Programa de Volcanismo Global del Instituto Smithsonian, agrupados por número CAVW; Programa de Volcanismo Global, 2013).



Las características de ubicación ideales incluyen:

- o Acceso a un área de tierra importante para ciertas observaciones clave, como despliegues sísmicos y geodésicos de gran apertura e InSAR. Esto probablemente impediría los arcos volcánicos de la isla, aunque la adquisición de imágenes de fuentes activas también podría ser posible a nivel marino para los volcanes submarinos. Los arcos volcánicos de la isla podrían incluirse entre las redes de sensores de volcanes.
- o Deberían ser accesibles exposiciones o registros excelentes de depósitos eruptivos pasados para el estudio del volumen, la intensidad de la erupción, la composición, la termobarometría, la geocronometría y la geovelocimetría en escalas de tiempo de  $10^{-2}$  a  $10^4$  años.
- o Objetivos que abarcan una gama de tasas de suministro de magma del manto. Idealmente, **los sensores de imágenes de volcanes** se implementarían en sistemas formados a partir de tasas de suministro de magma del manto superior, medio e inferior.
- o Los volcanes objetivo que permiten realizar pruebas de la velocidad de suministro del magma del manto como parámetro condicionante para la ubicación, profundidad, distribución y química del sistema de magma transcortical. Por este motivo, los magmas no deben contaminarse sustancialmente por interacciones de la corteza (p. ej., corteza gruesa). Como alternativa, las variaciones en el espesor de la corteza podrían verse como un parámetro de control crítico que varía a lo largo del rumbo en Chile.
- o Ubicación conjunta de algunas de los **sensores de imágenes de volcanes** con objetivos de FEC y L&S. Esto ofrecerá la mayor oportunidad de estudio intensivo en todo el sistema de arco.

Para identificar los sitios candidatos que cumplen con los criterios anteriores, reunimos un

*Inventario de arcos volcánicos de MDE* que tabula las características relevantes para todos los arcos volcánicos actualmente activos de la Tierra. El *Inventario de arcos volcánicos* incluye consideraciones tanto científicas como logísticas. En última instancia, las prioridades del país anfitrión y la aportación de expertos en toda la comunidad serán fundamentales para identificar sistemas objetivo específicos tanto para **redes de sensores de volcanes** como para **sensores de imágenes de volcanes**.

#### Segmentos de arco ideales para redes de sensores de volcanes

Los segmentos de arco ideales para **redes de sensores de volcanes** son aquellos que alojan múltiples volcanes activos que abarcan todo el rango de intensidad de erupción (VEI), tipo de magma, modo de desgasificación y deformación, estilo de desequilibrio y erupción, y parámetros de subducción y placa superior. El requisito principal para los objetivos de la **red de sensores de volcanes es la agitación, de manera que se puedan medir múltiples series temporales (p. ej., química de gas, flujo volátil, sismicidad y/o deformación)**. Un objetivo secundario son los volcanes con potencial de erupción en las próximas décadas. Como muestra la **Figura MDE-7**, las regiones con el mayor número y rango de VEI de volcanes en erupción frecuente (indicados por la extensión vertical/horizontal y el tamaño/color de los puntos en cada casilla de región) incluyen Indonesia, Kuriles/Kamchaka, Alaska/Aleutianas (aunque muchas erupciones son de VEI desconocido), Centroamérica y los Andes. El *Inventario de arcos volcánicos de MDE* indica además que estas regiones albergan un número relativamente grande de volcanes activos que abarcan una gama de tipos de magma. Por lo tanto, para las hipótesis que requieren capturar erupciones con un rango de VI, estas regiones son más fértiles para el despliegue de **redes de sensores de volcanes**.

La ubicación de **redes de sensores de volcanes** en un pequeño número de regiones o países permitiría la logística más eficiente, los esfuerzos de desarrollo de capacidades enfocados y el

almacenamiento en caché de instrumentos para **redes instrumentales de respuesta rápida**. También tendría el potencial de vincularse a campañas de observación de FEC y L&S. Un pequeño número de regiones o países también limitaría el rango de subducción y las variables de la placa superior que podrían explorarse. Teniendo en cuenta el acceso y las consideraciones logísticas, las regiones ideales para las **redes de sensores de volcanes** son Alaska/Aleutianas y los Andes, con un enfoque principal propuesto de los despliegues de redes de sensores de volcanes en Chile como el único país con el mayor número y el conjunto más diverso de volcanes potencialmente activos, y un área de estudio secundaria en los aleutians utilizando datos de las redes permanentes mantenidas por el observatorio de volcanes de Alaska. Para proporcionar una cobertura adecuada para abordar las preguntas científicas subyacentes a los **conjuntos de hipótesis A y C**, las **redes de sensores de volcanes** pueden extenderse más allá de los segmentos de subducción de enfoque.

## Segmentos de arco ideales para sensores de imágenes de volcanes

**Los sensores de imágenes de volcanes** deben ubicarse en arcos con un rango en las tasas de suministro de magma de manto. Sin embargo, debido a la dificultad para restringir estas velocidades, nos basamos en “parámetros de subducción” conocidos (es decir, flujo volátil, tasa de convergencia, edad de la placa, composición de la losa, estado de estrés de la placa superior) de manera que pueda formarse una imagen “representativa” del volcanismo de arco típico (p. ej., no en retroarco, tectónica/estructura de la corteza relativamente simple). A continuación enumeramos y evaluamos los arcos candidatos que representan una gama de tasas de suministro de magma (consulte el *Inventario de arcos volcánicos de MDE* para obtener una lista completa). Dada la apertura necesaria de las redes instrumentales geofísicas necesarias para obtener imágenes de las raíces profundas de los sistemas magmáticos transcorticales, observamos que los arcos isleños y submarinos son problemáticos para algunos tipos de

imágenes; sin embargo, otros (p. ej., sismología de fuente activa) pueden ser más adecuados para el despliegue marino. Por lo tanto, las observaciones integradas en el fondo marino pueden ser deseables en cualquier ubicación objetivo SZ4D dentro de los arcos isleños.

Otras consideraciones incluyen la capacidad de imagen, el acceso logístico, la viabilidad de las colaboraciones internacionales y la composición del magma. La comparación por pares entre sistemas máficos (volcanismo distribuido) y félsicos en cualquier segmento de arco proporciona perspectivas importantes. Es menos probable que los sistemas de bajo volumen o deficientes alberguen sistemas de magma de corteza grandes y fáciles de obtener de imagen de medio a bajo que informarían a los modelos del sistema transcortical. Las consideraciones logísticas han limitado en gran medida los estudios de volcanes en muchas regiones e incluyen inquietudes sobre la accesibilidad física, los permisos y el clima. Estas consideraciones varían en función del tipo de imagen implicada; los observatorios a largo plazo requieren un acceso diferente al de los estudios rápidos de bajo impacto. Operar fuera de los Estados Unidos requiere una amplia coordinación de colaboradores internacionales. Todas estas consideraciones varían a nivel global y regional.

Un objetivo general de la adquisición de imágenes es comparar sistemas con diferentes tasas de suministro de magma tanto a nivel transcortical como a nivel magmático superficial. Sin embargo, no hay medidas directas de las tasas de suministro o producción de magma en el manto. En su lugar, dependemos de sustitutos y “parámetros de subducción” secundarios que, en última instancia, pueden impulsar el suministro de magma para guiar la priorización de arcos específicos. Los modelos de flujo volátil dependen de una variedad de parámetros cinemáticos y térmicos y son importantes en la medida en que la fusión de flujo controla la entrada (p. ej., Cagnioncle et al., 2007; Wilson et al., 2014; Zellmer et al., 2015; Cerpa et al., 2018). Estos parámetros dependen en gran medida de las rutas térmicas seguidas de la placa descendente (van Keken et al., 2011).

La segunda fuente principal de magma, la fusión por descompresión, es más probable que esté controlada por la velocidad del flujo en las esquinas y, por lo tanto, la tasa de convergencia modificada por la geometría de cuña y la estructura térmica de la placa superior (Grove et al., 2012; England y Wilkins, 2004). También se ha planteado la hipótesis de que otros parámetros como el estado de estrés de la placa superior tienen un fuerte control sobre la producción de magma de manto (Karlstrom et al., 2009).

Teniendo en cuenta todos estos posibles sustitutos para la tasa de suministro de magma, se podrían establecer diversas prioridades. Un “caso extremo” en casi todos estos sustitutos es Cascadia, con su placa entrante muy joven, su convergencia lenta y la probabilidad de que los sedimentos y la corteza oceánica superior se deshidraten antes de alcanzar las profundidades subvolcánicas. Por lo tanto, el suministro de magma debería ser relativamente bajo en Cascadia en comparación con otros arcos. Muchas otras zonas de subducción (p. ej., Alaska Peninsular, Chile Central, Norte de Japón) probablemente proporcionen volúmenes sustanciales de volátiles a profundidades de subarco e impulsen el flujo a tasas de muchas decenas de km/millón de años y serían útiles para contrastar con Cascadia. Sin embargo, los sustitutos varían entre ellos, con tasas de subducción más altas en América Central o Chile que fuera de Alaska, pero con edades de placa entrantes más jóvenes. Las comparaciones entre Cascadia y al menos otras dos zonas de subducción más frías deberían proporcionar nuevas perspectivas sobre la tasa de suministro de magma. Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, así como los lugares propuestos para los despliegues de redes de sensores de volcanes en Alaska y Chile, proponemos ubicar **sensores de imágenes de volcanes** en Chile Central, Cascadia y la Alaska Peninsular.

#### Ubicaciones ideales para el estudio de sistemas exhumados

Los sistemas exhumados proporcionan un registro potencialmente complementario a los sistemas volcánicos activos, ya que representan

registros de corteza más profundos accesibles del tránsito de magmas desde el manto hasta la superficie. Los sistemas de arco antiguos, que representan tanto la corteza oceánica como la continental acumulada, están ampliamente presentes en el registro geológico y que varían en edad, profundidades de exposición y litologías. Un puñado de localidades representan secciones de la corteza del arco casi completas, preservando las profundidades desde la interfaz de la corteza y el manto hasta las rocas volcánicas y sedimentarias superficiales, y se han estudiado ampliamente (p. ej., arco de Talkeetna, arco de Kohistán). Otras localidades solo pueden conservar un registro de actividad magmática dentro de un rango de profundidad restringido (p. ej., arco del sur de Alisitos). Para ayudar en la evaluación de los sitios candidatos que cumplen con los criterios anteriores, reunimos un inventario de *secciones plutónicas del arco exhumado global* que tabula las características relevantes (edad, rango de profundidad expuesta, litologías y si está presente una sección volcánica contemporánea complementaria) para todas las localidades conocidas.

#### Atributos deseados

La elección de localidades que se pueden utilizar para abordar los tres conjuntos de hipótesis definidos en la Sección I dependerá de consideraciones como sus litologías, rangos de edad, disponibilidad de información previa y contextos geológicos. Se utilizarán varias localidades para probar las hipótesis. Los sitios elegidos podrían servir como comparaciones entre los sistemas activos, o podrían utilizarse potencialmente para relacionar los procesos activos observados por VolcArray con aquellos que tienen lugar en profundidad utilizando análogos antiguos exhumados de estos sistemas. Por ejemplo, muchos arcos muestran variabilidad en términos de velocidad de suministro de magma (p. ej., Sierran Arc). La comparación de los tiempos de permanencia en la corteza, las composiciones magmáticas y las profundidades de almacenamiento durante los períodos de tiempo de suministro de “magma alto” y “bajo” es un ejemplo de un estudio específico que podría

llevarse a cabo. Además, las localidades que conservan registros plutónicos y volcánicos contemporáneos podrían ser particularmente útiles para conectar las observaciones de plutones con las muestras de productos volcánicos. Las *secciones plutónicas del arco exhumado global* destacan las posibles localidades del estudio (p. ej., Talkeetna, antigua Cascadia, sur de Alisitos, Fiordland, Famatina, Serrana) que están bien caracterizadas y son archivos útiles de la corteza profunda, pero los posibles sitios del estudio no están destinados a limitarse a los enumerados. No se requiere caracterización previa (en términos de química, geocronología, modelado, etc.), aunque es útil. Los centros también podrían seleccionarse para coordinar las experiencias de campo y la logística con los **sensores de volcanes** y los **sensores de imágenes** en sistemas activos (p. ej., en Sudamérica o Cascadia)

## ACTIVIDADES CIENTÍFICAS INMEDIATAS QUE PUEDEN PRECEDER A LOS DESPLIEGUES DE SZ4D

Los resultados del trabajo en los datos y muestras existentes, junto con los esfuerzos experimentales y de modelado clave, serán esenciales para guiar los detalles de los futuros despliegues de SZ4D y, en última instancia, lograr los principales objetivos de MDE. Estos esfuerzos incluyen el uso de estudios petrológicos, experimentos de laboratorio, estudios geofísicos y modelos físicos para:

1. Limitar la arquitectura, la composición y el estado termodinámico de los sistemas magmáticos activos y extintos;
2. Establecer nuevas herramientas de observación para su uso en experimentos futuros;
3. Relacionar los datos geofísicos y petrológicos para crear limitaciones ampliamente autoconsistentes en los sistemas magmáticos; y

4. Desarrollar marcos de modelado numérico sólidos que puedan asimilar datos diversos, hacer predicciones sobre observaciones y explorar la fenomenología de los procesos de transporte de magma. Cada una de estas actividades está directamente vinculada a las hipótesis de MDE.

## Estudios de mapeo y datos instrumentales heredados

Dependiendo de las regiones seleccionadas, pueden estar disponibles desde años hasta décadas de datos continuos o de campaña para el reanálisis sistemático a la luz de las preguntas científicas de la MDE y los objetivos de observación. La evaluación de los datos existentes (p. ej., de instrumentos de monitorización sísmica continua o de campaña, GNSS y gas, y de observaciones de detección remota) y estudios anteriores (p. ej., geológico, flujo de calor,  $^3\text{He}/^4\text{He}$ , estudios/mapas de flujo de  $\text{CO}_2$ ) son, por tanto, actividades científicas inmediatas críticas para guiar la selección detallada del sitio y la planificación de experimentos, para proporcionar líneas de base para los despliegues de MDE y para proporcionar restricciones iniciales sobre las tasas de suministro del magma de manto.

## Muestras de erupciones anteriores

Las muestras existentes que actualmente se encuentran en repositorios y colecciones de investigación individuales se pueden estudiar para limitar la arquitectura, composición y estado termodinámico de los sistemas magmáticos de arco en la actualidad y a lo largo del tiempo. Del mismo modo, son necesarios estudios para examinar las relaciones intrusivas-extrusivas en sistemas magmáticos y pueden realizarse utilizando muestras existentes. Específicamente, la aplicación de herramientas petrológicas bien establecidas (p. ej., geotermobarómetros, higrómetros, relaciones de fase, geoquímica, geocronología) a estas muestras limitará las presiones, temperaturas, composiciones, profundidad, tiempos medios de reposo, eficiencia de extracción de fusión y mecanismos de inicio de erupciones de magmas y regiones

de almacenamiento de magmas de erupciones anteriores (**conjuntos de hipótesis A y B**). Se han llevado a cabo sistemáticamente pocos estudios de este tipo para un arco completo, o incluso un segmento de arco, especialmente para sistemas activos. Sin embargo, dicha información es fundamental para comprender la evolución y el estado actual del almacenamiento de corteza y magma en sistemas activos e inactivos. Por ejemplo, solo 27 de los 99 volcanes “activos” que emiten  $\text{SO}_2$  y/o se deforman activamente (Carn et al., 2017; Furtney et al., 2018) han tenido suficientes datos petrológicos recopilados para proporcionar estimaciones de presiones y temperaturas de almacenamiento de magma. Estos esfuerzos para recopilar datos nuevos y sintetizar los existentes para los volcanes objetivo serán fundamentales para contextualizar las mediciones de campo realizadas con el **sensor de volcanes** y **los sensores de imágenes**.

#### Experimentos de laboratorio

Los experimentos de laboratorio son una herramienta esencial para ampliar nuestra comprensión de los procesos magmáticos en arcos, pueden utilizarse como punto de partida para abordar las hipótesis de MDE y pueden informar el diseño y el despliegue de experimentos de campo. Los experimentos serán críticos para limitar las condiciones de P-T-X- $\text{H}_2\text{O}$ - $\text{CO}_2$  del almacenamiento de magma. Por ejemplo, la exploración de laboratorio del equilibrio de fases en el espacio P-T-X puede proporcionar más contexto y estimaciones más precisas que los geotermobarómetros para un sistema dirigido. Solo seis de los 99 volcanes “activos” mencionados anteriormente han sido sometidos a experimentos detallados de equilibrio de fases, lo que destaca la necesidad de este trabajo. Dichos experimentos serán particularmente útiles para los sistemas magmáticos activos elegidos para un estudio 4D exhaustivo utilizando **sensores de imágenes de volcanes**. Del mismo modo, los experimentos que restringen los controles de composición de presión en las relaciones  $\text{CO}_2/\text{SO}_2$  de gas volcánico son críticos para interpretar series temporales de gas que se

medirán mediante **redes de sensores de volcanes** y las relacionarán con procesos en profundidad y series temporales geofísicas adjuntas. Además, será necesario el desarrollo de geotermobarómetros mejorados y calibraciones de las relaciones cristalinidad-temperatura para extraer información sobre el estado del magma de muestras erupcionadas y puede preceder a despliegues instrumentales.

En la actualidad, existe una escasez de datos experimentales sobre las propiedades petrofísicas y los comportamientos reológicos de las redes de cristales y líquido volcánicas y los conjuntos rocosos. Los mecanismos (p. ej., sobrepresión, inestabilidad química) por los cuales el magma y los volátiles se fusionan y erupcionan no están claros. ¿Puede el magma sobrepresurizado romper las masas volcánicas? Si es así, ¿cuáles son los parámetros clave que controlan la transición del flujo dúctil a la fractura frágil? Se necesitan experimentos de física de rocas para proporcionar reologías realistas de magma y de roca huésped que puedan incorporarse en modelos de movimiento de magma y previsión de erupciones, así como para desarrollar modelos constitutivos relacionados con parámetros geofísicos (p. ej., módulos elásticos, resistividad eléctrica) al estado termodinámico del cuerpo de magma visualizado.

#### Modelado numérico

El modelado es esencial para unir las observaciones de campo (petrología, inversiones geodésicas y geofísicas) y para crear un marco para investigar la evolución de los sistemas magmáticos en un rango de escalas de tiempo y longitud. Los esfuerzos de modelado previos al despliegue también se pueden aprovechar para diseñar y guiar las estrategias de instrumentación e integración de datos. El modelado mecánico permite evaluar la respuesta del sistema magmático, definida por conjuntos de datos petrológicos, de experimentos de laboratorio y geofísicos, y sujeto a ecuaciones de gobierno supuestas, así como enfoques de implementación numérica, a diferentes tasas de suministro de magma y composición

de magma. Las señales pasadas y presentes de desequilibrios se pueden combinar para pronosticar y prever las condiciones que pueden iniciar una erupción y vincular los procesos volcánicos activos con el registro geológico. El modelado colaborativo para la subducción proporcionará un marco para abordar los desafíos comunes de modelado entre los grupos de trabajo de SZ4D, el desarrollo de código comunitario y el apoyo a la formación.

## PLAN DE COORDINACIÓN COMUNITARIA

Los planes claros para la coordinación de la ciencia y la divulgación en toda la comunidad son fundamentales para el éxito de SZ4D. En una encuesta de SZ4D de la comunidad vulcanológica, el 85 % de los encuestados identificó un esfuerzo multidisciplinario impulsado por la comunidad, como SZ4D, de una importancia para comprender las zonas de subducción. Sin embargo, en la misma encuesta, alrededor de la mitad de los encuestados identificaron a la comunidad vulcanológica académica estadounidense como 6/10 o menos en términos de organización. Evidentemente, hay un amplio acuerdo sobre la necesidad de una iniciativa como SZ4D para comprender preguntas integradoras como los peligros de la zona de subducción y los desafíos significativos en el desarrollo de la capacidad organizativa dentro de la comunidad alineada con MDE. De hecho, el *informe ERUPT de la Academia Nacional de Ciencias* (NASEM, 2017) destacó la mejora de la organización y la coordinación como objetivo principal. Afortunadamente, a raíz del informe ERUPT, varios esfuerzos vinculados, como la Red Comunitaria para la Respuesta a Erupciones Volcánicas (CONVERSE), RCN y MCS han forjado un camino claro hacia una mejor coordinación comunitaria. Desarrollaremos los exitosos planes de coordinación de estos esfuerzos para desarrollar planes de coordinación científica a lo largo de SZ4D y MDE.

Las lecciones clave de CONVERSE sobre la

respuesta rápida (consulte la **Sección IIIc**) incluyen una estructura organizativa transparente con comités asesores científicos para garantizar un proceso de solicitud abierto para la recogida de muestras y datos, la distribución de muestras y otros trabajos de campo. Por ejemplo, se solicitaron propuestas de una página de la comunidad para campañas de campo propuestas y acceso a muestras de la erupción del Kilauea de 2020. Estas propuestas fueron evaluadas por un comité asesor científico que trabajó estrechamente con el observatorio (Fischer et al., 2021). También son importantes los protocolos claros y coherentes para el manejo de datos y muestras, y la accesibilidad y la representación equitativa en la toma de decisiones en todas las comunidades, etapas profesionales y nacionalidades. Los intereses y las altas tasas de participación en las actividades de CONVERSE y MCS sugieren que representan el punto de partida para un plan satisfactorio de coordinación en SZ4D, con el objetivo general de resultados científicos más interdisciplinarios y más sólidos.

## RESUMEN DE RESULTADOS CIENTÍFICOS CLAVE Y MÁS AMPLIOS

Una métrica importante para el éxito de la iniciativa de SZ4D es la medida en que permitirá a la comunidad científica de la zona de subducción abordar preguntas e hipótesis que no serían accesibles sin la escala y la integración del esfuerzo de SZ4D. Las hipótesis motivadoras para la comunidad de MDE relacionan el suministro de manto de magma con el sistema magmático transcortical y, en última instancia, con los peligros volcánicos en la superficie del suelo. Probar estas hipótesis mejorará la comprensión de cómo funcionan los volcanes, con implicaciones para los peligros y previsiones a lo largo de las zonas de subducción. En términos más generales, el esfuerzo de SZ4D desarrollará la capacidad organizativa, de infraestructura y de formación en toda la comunidad científica vulcanológica.

### Enlaces a bases de datos y matrices de trazabilidad de MDE

- o Matriz de trazabilidad
- o Inventario de arcos volcánicos de MDE
- o Secciones plutónicas del arco exhumado global

## REFERENCIAS

- Aiuppa, A., Bitetto, M., Francofonte, V., Velasquez, G., Parra, C. B., Giudice, G., Liuzzo, M., et al. (2017). A CO<sub>2</sub>-gas precursor to the March 2015 Villarrica volcano eruption. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(6), 2120–2132. <https://doi.org/10.1002/2017GC006892>
- Alasino, P., Casquet, C., Galindo, C., Pankhurst, R., Rapela, C., Dahlquist, J., Recio, C., et al. (2020). O–H–Sr–Nd isotope constraints on the origin of the Famatinian magmatic arc, NW Argentina. *Geological Magazine*, 157(12), 2067–2080. <https://doi.org/10.1017/S0016756820000321>
- Allibone, A. H., Jongens, R., Scott, J. M., Tulloch, A. J., Turnbull, I. M., Cooper, A. F., Powell, N. G., et al. (2009). Plutonic rocks of the Median Batholith in eastern and central Fiordland, New Zealand: Field relations, geochemistry, correlation, and nomenclature. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 52(2), 101–148. <https://doi.org/10.1080/00288300909509882>
- Ardill, K., Paterson, S., & Memeti, V. (2018). Spatiotemporal magmatic focusing in upper-mid crustal plutons of the Sierra Nevada arc. *Earth and Planetary Science Letters*, 498, 88–100. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.06.023>
- Armas, P., Cristofolini, E. A., Otamendi, J. E., Tibaldi, A. M., Barzola, M. G. & Camilletti, G. C. (2018). Geochronology and facies analysis of subaqueous volcanism of Lower Ordovician, Famatinian arc, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 84, 255–265. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.04.005>
- Aubry, T. J., Farquharson, J. I., Rowell, C. R., Watt, S. F. L., Pinel, V., Beckett, F., Fasullo, J., et al. (2022). Impact of climate change on volcanic processes: current understanding and future challenges. *Bulletin of Volcanology*, 84, 58 <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01562-8>
- Bamber, E. C., Arzilli, F., Polacci, M., Hartley, M. E., Fellowes, J., Di Genova, D., Chavarría, D., et al. (2020). Pre- and syn-eruptive conditions of a basaltic Plinian eruption at Masaya Volcano, Nicaragua: The Masaya Triple Layer (2.1 ka). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 392, 106761 <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.106761>
- Brown, S. K., Auken, M. R., & Sparks, R. S. J. (2015). Populations around Holocene volcanoes and development of a Population Exposure Index. In: Loughlin, S. C., Sparks R. S. J., Brown, S. K., Jenkins, S. F., & Vye-Brown C. (eds.) *Global Volcanic Hazards and Risk* (pp. 223–232). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781316276273.006>
- Cagnioncle, A. M., Parmentier, E. M., & Elkins-Tanton, L. T. (2007). Effect of solid flow above a subducting slab on water distribution and melting at convergent plate boundaries. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B9). <https://doi.org/10.1029/2007JB004934>
- Canil, D., Styan, J., Larocque, J., Bonnet, E. & Kyba, J. (2010). Thickness and composition of the Bonanza arc crustal section, Vancouver Island, Canada. *GSA Bulletin*, 122(7–8), 1094–1105. <https://doi.org/10.1130/B26578.1>
- Carn, S. A., Fioletov, V. E., McLinden, C. A., Li, C., & Krotkov, N. A. (2017). A decade of global volcanic SO<sub>2</sub> emissions measured from space. *Scientific Reports*, 7, 44095 <https://doi.org/10.1038/srep44095>
- Cashman, K. V., Sparks, R. S. J., & Blundy, J. D. (2017). Vertically extensive and unstable magmatic systems: A unified view of igneous processes. *Science*, 355(6331). <https://doi.org/10.1126/science.aag3055>
- Castro, J. M., & Dingwell, D. B. (2009). Rapid ascent of rhyolitic magma at Chaitén volcano, Chile. *Nature*, 461(7265), 780–783. <https://doi.org/10.1038/nature08458>
- Cerpa, N. G., Wada, I., & Wilson, C. R. (2018). Effects of fluid influx, fluid viscosity, and fluid density on fluid migration in the mantle wedge and their implications for hydrous melting. *Geosphere*, 15(1), 1–23. <https://doi.org/10.1130/GES01660.1>

- Chapman, A. D., Saleeby, J. B., Wood, D. J., Piasecki, A., Kidder, S., Ducea, M. N., & Farley, K. A. (2012). Late Cretaceous gravitational collapse of the southern Sierra Nevada batholith, California. *Geosphere*, 8(2), 314–341. <https://doi.org/10.1130/GES00740.1>
- Cisterna, C. E. and Coira, B. (2014). Subaqueous eruption-fed mass-flow deposits: records of the Ordovician arc volcanism in the Northern Famatina Belt; Northwestern Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 49, 73–84. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2013.11.002>
- Costa, F. (2021). Clocks in magmatic rocks. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 49, 231–252. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-080320-060708>
- DeBari, S. M., Anderson, R. G., & Mortensen, J. K. (1999). Correlation among lower to upper crustal components in an island arc: The Jurassic Bonanza arc, Vancouver Island, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 36(8), 1371–1413. <https://doi.org/10.1139/e99-029>
- Degruyter, W., & Huber, C. (2014). A model for eruption frequency of upper crustal silicic magma chambers. *Earth and Planetary Science Letters*, 403, 117–130. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.06.047>
- De Paoli, M. C., Clarke, G. L., Klepeis, K. A., Allibone, A. H., & Turnbull, I. M. (2009). The eclogite–granulite transition: Mafic and intermediate assemblages at Breaksea Sound, New Zealand. *Journal of Petrology*, 50(12), 2307–2343. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp078>
- Dessimoz, M., Müntener, O., & Ulmer, P. (2012). A case for hornblende dominated fractionation of arc magmas: The Chelan Complex (Washington Cascades). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 163(4), 567–589. <https://doi.org/10.1007/s00410-011-0685-5>
- D’Souza, R. J., Canil, D., & Creaser, R. A. (2016). Assimilation, differentiation, and thickening during formation of arc crust in space and time: The Jurassic Bonanza arc, Vancouver Island, Canada. *GSA Bulletin*, 128(3–4), 543–557. <https://doi.org/10.1130/B31289.1>
- Ducea, M. N., Bergantz, G. W., Crowley, J. L., & Otamendi, J. (2017). Ultrafast magmatic buildup and diversification to produce continental crust during subduction. *Geology*, 45(3), 235–238. <https://doi.org/10.1130/G38726.1>
- Ducea, M. N., Saleeby, J. B., & Bergantz, G. (2015). The architecture, chemistry, and evolution of continental magmatic arcs. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43, 299–331. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060614-105049>
- Economos, R. C., Paterson, S. R., Said, L. O., Ducea, M. N., Anderson, J. L., & Padilla, A. J. (2012). Gobi-Tianshan connections: Field observations and isotopes from an early Permian arc complex in southern Mongolia. *GSA Bulletin*, 124(11–12), 1688–1701. <https://doi.org/10.1130/B30324.1>
- England, P., & Wilkins, C. (2004). A simple analytical approximation to the temperature structure in subduction zones. *Geophysical Journal International*, 159, 1138–1154. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02419.x>
- Farner, M. J., & Lee, C. T. A. (2017). Effects of crustal thickness on magmatic differentiation in subduction zone volcanism: A global study. *Earth and Planetary Science Letters*, 470, 96–107. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.04.025>
- Fischer, T. P., Moran, S. C., Cooper, K. M., Roman, D. C., & LaFemina, P. C. (2021). Making the most of volcanic eruption responses, *Eos*, 102, <https://doi.org/10.1029/2021EO162790>
- Furtney, M. A., Pritchard, M. E., Biggs, J., Carn, S. A., Ebmeier, S. K., Jay, J. A., Kilbride, B. T. M., & Reath, K.A. (2018). Synthesizing multi-sensor, multi-satellite, multi-decadal datasets for global volcano monitoring. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 365, 38–56. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.10.002>
- Gehrels, G., Rusmore, M., Woodsworth, G., Crawford, M., Andronikos, C., Hollister, L., Patchett, J., et al. (2009). U-Th-Pb geochronology of the Coast Mountains batholith in north-coastal British Columbia: Constraints on age and tectonic evolution. *GSA Bulletin*, 121(9–10), 1341–1361. <https://doi.org/10.1130/B26404.1>
- Girona, T., Realmuto, V., & Lundgren, P. (2021). Large-scale thermal unrest of volcanoes for years prior to eruption. *Nature Geoscience*, 14(4), 238–241. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00705-4>
- Glazner, A. F., Bartley, J. M., Coleman, D. S., Gray, W., & Taylor, R. Z. (2004). Are plutons assembled over millions of years by amalgamation from small magma chambers?. *GSA Today*, 14, 4–12. [https://doi.org/10.1130/1052-5173\(2004\)014<0004:APAOMO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/1052-5173(2004)014<0004:APAOMO>2.0.CO;2)
- Global Volcanism Program. (2013). *Volcanoes of the World*, v. 4.11.0 (08-jun-2022). Venzke, E. (ed.). Smithsonian

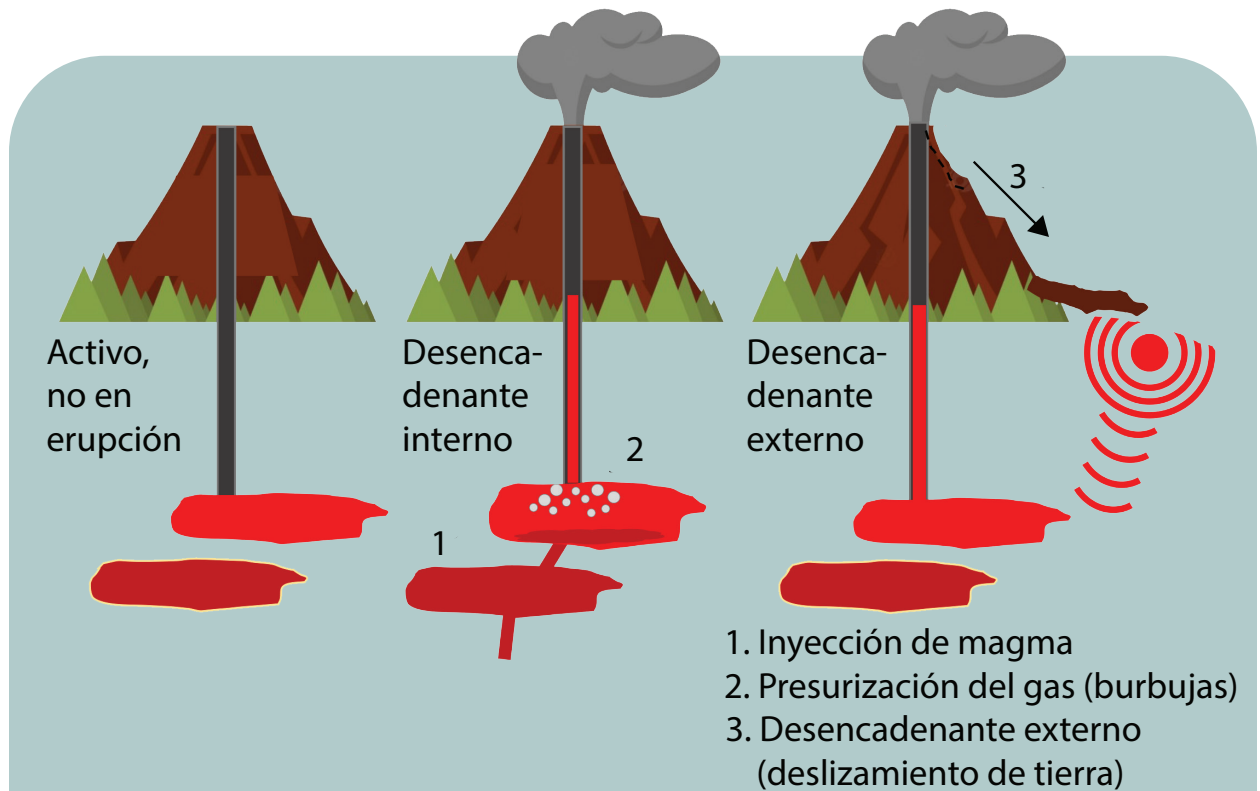
- Institution. Descargado el 21 de julio de 2022. <https://doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW4-2013>
- Gonnermann, H. M., & Manga, M. (2012). Dynamics of magma ascent in the volcanic conduit. In Fagents, S. A., Gregg, T. K. P., & Lopes, R. M. C. (eds.). *Modeling Volcanic Processes: The Physics and Mathematics of Volcanism* (55–84). Cambridge University Press: Cambridge. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139021562.004>
- Gonnermann, H., & Anderson, K. (2021). Modeling Volcano-Magmatic Systems: Workshop Report for the Modeling Collaboratory for Subduction Research Coordination Network. EarthArXiv version 1 preprint, <https://doi.org/10.31223/X55G96>
- Gregg, P. M., De Silva, S. L., Grosfils, E. B., & Parmigiani, J. P. (2012). Catastrophic caldera-forming eruptions: Thermomechanics and implications for eruption triggering and maximum caldera dimensions on Earth. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 241–242, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.06.009>
- Grove, T. L., Till, C. B., & Krawczynski, M. J. (2012). The role of H<sub>2</sub>O in subduction zone magmatism. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 40, 413–439. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-042711-105310>
- Gualda, G. A., Gravley, D. M., Connor, M., Hollmann, B., Pamukcu, A. S., Bégué, F., Ghiorso, M.S., & Deering, C. D. (2018). Climbing the crustal ladder: Magma storage-depth evolution during a volcanic flare-up. *Science Advances*, 4(10). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aap7567>
- Guo, L., Jagoutz, O., Shinevar, W. J. & Zhang, H. F. (2020). Formation and composition of the Late Cretaceous Gangdese arc lower crust in southern Tibet. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 175(6), 1–26. <https://doi.org/10.1007/s00410-020-01696-y>
- Huber, C., Townsend, M., Degruyter, W., & Bachmann, O. (2019). Optimal depth of subvolcanic magma chamber growth controlled by volatiles and crust rheology. *Nature Geoscience*, 12(9), 762–768. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0415-6>
- Jagoutz, O., & Schmidt, M.W. (2013). The composition of the foundered complement to the continental crust and a re-evaluation of fluxes in arcs. *Earth and Planetary Science Letters*, 371, 177–190. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.03.051>
- Karlstrom, L., Dufek, J., & Manga, M. (2009). Organization of volcanic plumbing through magmatic lensing by magma chambers and volcanic loads. *Journal Of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B10). <https://doi.org/10.1029/2009JB006339>
- Katz, R. F., Rees Jones, D. W., Rudge, J. F., & Keller, T. (2022). Physics of melt extraction from the mantle: Speed and style. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 50, 507–540. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-032320-083704>
- Kent, A. J., Till, C. B., & Cooper, K. M. (2020). Studying the initiation of volcanic eruptions: Time for a petrological perspective. EarthArxiv. <https://doi.org/10.31223/X5S01X>
- Kidder, S., Ducea, M., Gehrels, G., Patchett, P.J., & Vervoort, J. (2003). Tectonic and magmatic development of the Salinian Coast Ridge belt, California. *Tectonics*, 22(5). <https://doi.org/10.1029/2002TC001409>
- Klein, B. Z., Jagoutz, O., & Ramezani, J. (2021). High-precision geochronology requires that ultrafast mantle-derived magmatic fluxes built the transcrustal Bear Valley Intrusive Suite, Sierra Nevada, California, USA. *Geology*, 49(1), 106–110. <https://doi.org/10.1130/G47952.1>
- Larocque, J., & Canil, D. (2010). The role of amphibole in the evolution of arc magmas and crust: The case from the Jurassic Bonanza arc section, Vancouver Island, Canada. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 159(4), 475–492. <https://doi.org/10.1007/s00410-009-0436-z>
- Lerner, A. H., O'Hara, D., Karlstrom, L., Ebmeier, S. K., Anderson, K. R., & Hurwitz, S. (2020). The prevalence and significance of offset magma reservoirs at arc volcanoes. *Geophysical Research Letters*, 47(14), e2020GL087856. <https://doi.org/10.1029/2020GL087856>
- Matzel, J. E., Bowring, S. A., & Miller, R. B. (2008). Spatial and temporal variations in Nd isotopic signatures across the crystalline core of the North Cascades, Washington. In Wright, J. E., & Shervais, J. W. (eds.). *Ophiolites, Arcs, and Batholiths: A Tribute to Cliff Hopson* (Chapter). Geological Society of America Special Paper, 438 [https://doi.org/10.1130/2008.2438\(18\)](https://doi.org/10.1130/2008.2438(18))
- Miller, R. B., Paterson, S. R., Matzel, J. P., & Snoke, A. W. (2009). Plutonism at different crustal levels: Insights from the 5–40 km (paleodepth) North Cascades crustal section, Washington. In Miller, R. B., & Snoke, A. W. (eds.). *Geological Crustal Cross Sections from the Western North American Cordillera and Elsewhere*:

- Implications for Tectonic and Petrologic Processes* (pp.125–149). Geological Society of America Special Paper, 456 [https://doi.org/10.1130/2009.2456\(05\)](https://doi.org/10.1130/2009.2456(05))
- Morris, R. A., DeBari, S. M., Busby, C., Medynski, S., & Jicha, B. R. (2019). Building arc crust: Plutonic to volcanic connections in an extensional oceanic arc, the southern Alisitos arc, Baja California. *Journal of Petrology*, 60(6), 1195–1228. <https://doi.org/10.1093/petrology/egz029>
- Mpodozis, C., & Kay, S. M. (1992). Late Paleozoic to Triassic evolution of the Gondwana margin: Evidence from Chilean Frontal Cordilleran batholiths (28°S to 31°S). *GSA Bulletin*, 104(8), 999–1014. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1992\)104<0999:LPTTEO>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1992)104<0999:LPTTEO>2.3.CO;2)
- NASEM (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine). (2017). *Volcanic Eruptions and Their Repose, Unrest, Precursors, and Timing*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/24650>.
- Newhall, C.G., & Self, S. (1982). The volcanic explosivity index (VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research*, 87, 1231–1238. <https://doi.org/10.1029/JC087iC02p01231>
- INSAR. (2018). NASA-ISRO SAR (INSAR) Mission Science Users' Handbook. NASA Jet Propulsion Laboratory. 261 pp.
- Nishimura, T. (2017). Triggering of volcanic eruptions by large earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 44(15), 7750–7756. <https://doi.org/10.1002/2017GL074579>
- Otamendi, J. E., Cristofolini, E. A., Morosini, A., Armas, P., Tibaldi, A. M., & Camilletti, G. C. (2020). The geodynamic history of the Famatinian arc, Argentina: A record of exposed geology over the type section (latitudes 27°–33° South). *Journal of South American Earth Sciences*, 100, 102558 <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102558>
- Otamendi, J. E., Tiepolo, M., Walker Jr., B. A., Cristofolini, E. A., & Tibaldi, A.M. (2016). Trace elements in minerals from mafic and ultramafic cumulates of the central Sierra de Valle Fértil, Famatinian arc, Argentina. *Lithos*, 240, 355–370. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.11.009>
- Otamendi, J. E., Ducea, M. N., & Bergantz, G. W. (2012). Geological, petrological and geochemical evidence for progressive construction of an arc crustal section, Sierra de Valle Fértil, Famatinian Arc, Argentina. *Journal of Petrology*, 53(4), 761–800. <https://doi.org/10.1093/petrology/egr079>
- Passarelli, L., & Brodsky, E. E. (2012). The correlation between run-up and repose times of volcanic eruptions. *Geophysical Journal International*, 188(3), 1025–1045. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05298.x>
- Pesicek, J. D., Wellik, J. J., Prejean, S. G., & Ogburn, S. E. (2018). Prevalence of seismic rate anomalies preceding volcanic eruptions in Alaska. *Frontiers in Earth Science*, 6, 100 <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00100>
- Power, J. A., Stihler, S. D., Chouet, B. A., Haney, M. M., & Ketner, D. M. (2013). Seismic observations of Redoubt Volcano, Alaska - 1989–2010 and a conceptual model of the Redoubt magmatic system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 259, 31–44. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.09.014>
- Reath, K., Pritchard, M., Biggs, J., Andrews, B., Ebmeier, S.K., Bagnardi, M., Girona, T., et al. (2020). Using conceptual models to relate multiparameter satellite data to subsurface volcanic processes in Latin America. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 21(1), e2019GC008494. <https://doi.org/10.1029/2019GC008494>
- Roman, D. C., & Cashman, K. V. (2018). Top-down precursory volcanic seismicity: Implications for 'stealth' magma ascent and long-term eruption forecasting. *Frontiers in Earth Science*, 6, 124 <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00124>
- Ruprecht, P., & Plank, T. (2013). Feeding andesitic eruptions with a high-speed connection from the mantle. *Nature*, 500(7460), 68–72. <https://doi.org/10.1038/nature12342>
- Sable, J. E., Houghton, B. F., Del Carlo, P., & Coltelli, M. (2006). Changing conditions of magma ascent and fragmentation during the Etna 122 BC basaltic Plinian eruption: Evidence from clast microtextures. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 158(3–4), 333–354. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.07.006>
- Schwartz, J. J., Klepeis, K. A., Sadorski, J. F., Stowell, H. H., Tulloch, A. J., & Coble, M. A. (2017). The tempo of continental arc construction in the Mesozoic Median Batholith, Fiordland, New Zealand. *Lithosphere*, 9(3), 343–365. <https://doi.org/10.1130/L610.1>
- Shea, E. K., Miller, J. S., Miller, R. B., Chan, C. F., Kent, A. J., Hanchar, J. M., Dustin, K., & Elkins, S. (2018). Time scale for the development of thickened crust in the Cretaceous North Cascades magmatic arc, Washington,

- and relationship to Cretaceous flare-up magmatism. *Lithosphere*, 10(6), 708–722. <https://doi.org/10.1130/L1001.1>
- Schaefer, L. N., Wang, T., Escobar-Wolf, R., Oommen, T., Lu, Z., Kim, J., Lundgren, P.R., & Waite, G.P. (2017). Three-dimensional displacements of a large volcano flank movement during the May 2010 eruptions at Pacaya Volcano, Guatemala. *Geophysical Research Letters*, 44(1), 135–142. <https://doi.org/10.1002/2016GL071402>
- Shreve, T., Grandin, R., Behera, A., Boichu, M., Moussallam, Y., Delgado, F., Pieters, N., et al. (2019). The December 2018 eruption of Ambrym volcano: Constraints on the magma plumbing system through the joint analysis of ground deformation and degassing data. *Geophysical Research Abstracts*, 21.
- Syracuse, E. M., & Abers, G. A. (2006). Global compilation of variations in slab depth beneath arc volcanoes and implications. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7(5). <https://doi.org/10.1029/2005GC001045>
- Theys, N., Hedelt, P., De Smedt, I., Lerot, C., Yu, H., Vlietinck, J., Pedergrana, M., et al. (2019) Global monitoring of volcanic SO<sub>2</sub> degassing from space with unprecedented resolution. *Scientific Reports*, 9, 2643 <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39279-y>
- Till, C. B., Kent, A. J. R., Abers, G. A., Janiszewski, H. A., Gaherty, J. B., & Pitcher, B. W. (2019). The causes of spatiotemporal variations in erupted fluxes and compositions along a volcanic arc. *Nature Communications*, 10, 1350 <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09113-0>
- Turner, S. J., & Langmuir, C. H. (2015). The global chemical systematics of arc front stratovolcanoes: Evaluating the role of crustal processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 422, 182–193. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.03.056>
- van Keken, P. E., Hacker, B. R., Syracuse, E. M., & Abers, G. A. (2011). Subduction Factory 4: Depth-dependent flux of H<sub>2</sub>O from subducting slabs worldwide. *Journal of Geophysical Research*, 116(B1), <https://doi.org/10.1029/2010JB007922>
- Watanabe, K., Danhara, T., Watanabe, K., Terai, K., & Yamashita, T. (1999). Juvenile volcanic glass erupted before the appearance of the 1991 lava dome, Unzen volcano, Kyushu, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 89(1–4), 113–121. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(98\)00127-9](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(98)00127-9)
- Watt, S. F., Pyle, D. M., & Mather, T. A. (2013). The volcanic response to deglaciation: Evidence from glaciated arcs and a reassessment of global eruption records. *Earth-Science Reviews*, 122, 77–102. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.03.007>
- Werner, C., Fischer, T. P., Aiuppa, A., Edmonds, M., Cardellini, C., Carn, S., Chiodini, G., et al. (2019). Carbon dioxide emissions from subaerial volcanic regions. In Orcutt, B. N., Daniel, I., & Dasgupta, R. (eds.) *Deep Carbon: Past to Present* (188–236). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108677950.008>
- Wilson, C. J. N., Houghton, B. F., McWilliams, M. O., Lanphere, M. A., Weaver, S. D., & Briggs, R. M. (1995). Volcanic and structural evolution of Taupo Volcanic Zone, New Zealand: A review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 68(1–3), 1–28. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(95\)00006-G](https://doi.org/10.1016/0377-0273(95)00006-G)
- Wilson, C. R., Spiegelman, M., van Keken, P. E., & Hacker, B. R. (2014). Fluid flow in subduction zones: The role of solid rheology and compaction pressure. *Earth and Planetary Science Letters*, 401, 261–274. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.05.052>
- Xue, X., Freymueller, J., & Lu, Z. (2020). Modeling the posteruptive deformation at Okmok based on the GPS and InSAR time series: Changes in the shallow magma storage system. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(2), e2019JB017801. <https://doi.org/10.1029/2019JB017801>
- Zellmer, G. F., Edmonds, M., & Straub, S. M. (2015). Volatiles in subduction zone magmatism. In Zellmer, G. F., Edmonds, M., & Straub, S. M. (eds.) *The Role of Volatiles in the Genesis, Evolution and Eruption of Arc Magmas* (pp. 1–17). Geological Society, London, Special Publications, 410 <https://doi.org/10.1144/SP410.13>
- Zhu, W., Gaetani, G. A., Fosseis, F., Montési, L. G., & De Carlo, F. (2011). Microtomography of partially molten rocks: three-dimensional melt distribution in mantle peridotite. *Science*, 332(6025), 88–91. <https://doi.org/10.1126/science.1202221>
- Zhu, W., Fosseis, F., Lisabeth, H., Xing, T., Xiao, X., De Andrade, V., & Karato, S. I. (2016). Experimental evidence of reaction-induced fracturing during olivine carbonation. *Geophysical Research Letters*, 43(18), 9535–9543. <https://doi.org/10.1002/2016GL070834>

## BARRA LATERAL 3

*¿Qué impulsa una erupción volcánica?*



Las erupciones volcánicas son desencadenadas tanto por procesos internos (desde dentro del magma o el sistema magmático) como por procesos externos (p. ej., deslizamientos de tierra, terremotos). El mecanismo más común para desencadenar erupciones en configuraciones de arco es un magma más profundo y caliente que entra en una región de almacenamiento de magmas menos profunda, pero las erupciones también pueden iniciarse por la acumulación de presión de gas relacionada con la cristalización. Una pregunta abierta que los volcanólogos están intentando restringir es cuánto tiempo transcurrirá entre el evento desencadenante y la erupción física.

# DESARROLLO DE EQUIDAD Y CAPACIDAD GEOCIENTÍFICA



PARA UNA COMUNIDAD CIENTÍFICA MÁS  
INCLUSIVA Y UNA COMPRENSIÓN MÁS AMPLIA  
DE LOS PELIGROS GEOLÓGICOS PARA ABORDAR  
LOS PROBLEMAS DE JUSTICIA SOCIAL Y EQUIDAD  
EN LA MITIGACIÓN DE PELIGROS

## RESUMEN

Al principio de las discusiones sobre SZ4D, la comunidad reconoció que una iniciativa de esta escala y alcance ofrecía la oportunidad de implementar una lista de actividades cuidadosamente consideradas para garantizar el “impacto mayor” a largo plazo del programa. Los conceptos tratados se fusionan en dos temas paralelos y complementarios:

1. Comunicar mejor la comprensión científica de las zonas de subducción y los peligros asociados al público, y
2. Formar a una nueva generación de investigadores para que respondan a preguntas

científicas clave sobre los procesos de subducción utilizando enfoques interdisciplinarios (McGuire et al., 2017).

Para desarrollar estos temas, a principios de 2021, científicos y especialistas de SZ4D en educación geocientífica, difusión pública, diversidad y estructuras organizativas se unieron para formar el grupo integrador de desarrollo de equidad y capacidad geocientífica (BECG). Desde entonces, BECG ha investigado una serie de programas y actividades para considerar cómo SZ4D podría ser transformador para los estudiantes y profesores estadounidenses, los participantes internacionales y las comunidades directamente afectadas por los peligros de la subducción. BECG exploró temas más allá de

los impactos tradicionales más amplios en los esfuerzos de educación y difusión, incluidos el desarrollo de capacidades internacionales, las mejores prácticas para llevar a cabo investigaciones interdisciplinarias (Till et al., 2017) y los factores que han socavado durante mucho tiempo la pertenencia, el acceso, la justicia, la equidad, la diversidad y la inclusión (BAJEDI) en las geociencias (p. ej., Bernard y Cooperdock, 2018; Williams-Stroud, 2021; Beane et al., 2021). Además, BECG consultó la bibliografía de ciencias sociales y recopiló las mejores prácticas aprendidas de nuestra comunidad para ayudar en el desarrollo de una lista de actividades de impacto más amplias que respaldan los objetivos científicos identificados por los otros grupos de trabajo y grupos integradores de SZ4D. BECG formuló las seis áreas principales siguientes en las que SZ4D debería concentrar sus esfuerzos de impacto más amplios:

1. Desarrollar capacidad para la investigación colaborativa internacional, la formación y el intercambio de datos;
2. Promover la equidad ante peligros y la justicia social;
3. Apoyar la educación y la formación basadas en evidencias;
4. Aumentar la eficacia de la difusión pública;
5. Fortalecer la colaboración interdisciplinaria; y
6. Mejorar BAJEDI.

A partir de estas seis áreas (**Figura BECG-1**), BECG desarrolló **seis preguntas de investigación** para enmarcar sus debates sobre cómo SZ4D podría motivar cambios dentro de comunidades ubicadas en entornos de zonas de subducción y dentro de la comunidad de geociencias, tanto en Estados Unidos como a nivel internacional.

En las siguientes secciones, profundizamos en los componentes de estas seis preguntas de investigación, incluidos los objetivos sugeridos, las necesidades principales y las posibles actividades. Este texto sigue nuestras *matrices de trazabilidad para cada una de las preguntas de investigación*. Las secciones restantes de

este capítulo proponen un marco y un plan de implementación para cumplir estos objetivos y necesidades.

## PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

### Desarrollo de capacidades internacionales

**PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN 1:** ¿Cómo podemos aprovechar los esfuerzos en asociaciones internacionales equitativas de desarrollo de capacidades que mejoran las capacidades (p. ej., habilidades, datos, software, tecnología, comprensión) para todos los científicos y partes interesadas involucrados? ¿Qué necesitamos incorporar a nuestros programas para que estas mejoras sean sostenibles?

Para abordar las preguntas relacionadas con el desarrollo de capacidades internacionales, un objetivo principal es **establecer y promover las mejores prácticas para la investigación cooperativa de campo internacional**, especialmente en el contexto de la ciencia de SZ4D. Esto implicará una amplia recopilación de información y una revisión bibliográfica del desarrollo sostenible de la capacidad humana y de la infraestructura técnica en las geociencias. Un principio clave para asociarse eficazmente con científicos, agencias y universidades responsables de la ciencia de la zona de subducción y la gestión de peligros es establecer los elementos de la cooperación equitativa, como los lineamientos de propiedad intelectual, la distribución de costes, los planes de actividades de campo y el acuerdo sobre expectativas científicas antes de comenzar el trabajo. La formación de los participantes de SZ4D ubicados en EE. UU. y la estrecha colaboración con todas las partes interesadas internacionales (legisladores, científicos y educadores) desde el inicio del proceso de planificación pueden garantizar que tenemos objetivos compartidos y planes claros que beneficiarán a las comunidades locales.

El segundo objetivo es **establecer y promover las mejores prácticas para los datos FAIR**

(**encontrables, accesibles, interoperables y reutilizables**) entre investigadores internacionales (Wilkinson et al., 2016). SZ4D debe garantizar que sus datos y productos de datos sean accesibles abiertamente, pero también puede implementar políticas que incentivan mejor el intercambio de datos de otras entidades para mejorar la calidad de los resultados de la investigación y minimizar las limitaciones de acceso e interpretación (Fecher et al., 2015). Esto implicará un diálogo activo y organizado desde el principio para comprender las necesidades y transmitir prácticas de datos FAIR que se han desarrollado colectivamente durante las últimas décadas dentro de las comunidades de investigación de EE. UU. e internacionales. El centro de SZ4D estará posicionado para aprovechar la experiencia de sus grupos constituyentes para ayudar a los nuevos socios a superar las posibles limitaciones (p. ej., infraestructura, capital humano) y otros desafíos (p. ej., Boeckhout et al., 2018; Tenopir et al., 2011). Tener un plan claro y sostenible para la ciencia abierta es esencial para la cooperación entre agencias. Puede afectar a la ciencia de los peligros y presentar una visión unificada a aquellos que no son científicos.

El tercer objetivo es **promover la comunicación abierta, eficaz y bilateral y la formación científica**. El desarrollo de comunicación multilingüe eficaz y oportunidades de formación es fundamental para desarrollar y mantener asociaciones internacionales. SZ4D debe trabajar con colaboradores nacionales, oficinas educativas existentes y científicos sociales para desarrollar contenido adecuado en formatos eficaces y con consideraciones culturales cuidadosas. Esto se puede lograr facilitando la colaboración entre científicos físicos y sociales para aprender sobre intereses educativos y contexto que mejorarían la eficacia de la comunicación científica.

El cuarto objetivo es **desarrollar vías de financiación sostenibles para programas de formación e intercambio bilaterales y multinacionales**. Lograr este objetivo requiere buscar la financiación adecuada en toda la organización de SZ4D con el objetivo de perpetuar el programa de formación y expandirlo a otras comunidades y países después de SZ4D. Un enfoque podría ser identificar asociaciones que puedan financiar el intercambio extranjero de estudiantes para ayudar con la recopilación de datos, con énfasis



Figura BECG-1. Objetivos de investigación del grupo de desarrollo de equidad y capacidad geocientífica (BECG).

en apoyar a estudiantes de comunidades que se ven directamente afectadas por los peligros de la zona de subducción. Un posible objetivo de SZ4D es proporcionar la misma financiación a estudiantes estadounidenses e internacionales.

Por último, reconocemos que un objetivo importante es **minimizar los métodos de interacción imperialistas o coloniales**. Dichas interacciones pueden adoptar la forma de “otorgar conocimientos” de los PI sobre colaboradores internacionales, en el sentido de que los PI simplemente necesitan apoyo de campo para llevar a cabo la investigación, al tiempo que resisten cualquier contribución intelectual o “extracción de conocimientos” por parte de los PI de sus poblaciones indígenas y no otorgan crédito a sus contribuciones o cualquier investigación previa realizada en el país (p. ej., Cartier, 2019; Wight, 2021). Nuestra comunidad debe trabajar con socios internacionales, países anfitriones y científicos sociales (Nordling, 2017) para implementar formación sobre sesgos interculturales e implícitos para colaboraciones internacionales, incluida la formación básica general y consideraciones específicas de la ubicación que aumenten la concienciación sobre las actitudes coloniales subyacentes integradas en las interacciones tradicionales (Stefanoudis et al., 2021).

## Equidad en la mitigación de peligros

**PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN 2: Los peligros geológicos afectan de forma desproporcionada a comunidades específicas. ¿Cómo traducimos la comprensión mejorada de los peligros geológicos de la zona de subducción en productos que se pueden utilizar para informar y abordar problemas de justicia social y equidad en la mitigación de peligros? ¿Qué consideraciones deben tomarse para garantizar un compromiso equitativo y resultados para esas comunidades?**

El primer objetivo que busca abordar la equidad en la mitigación de peligros es **fortalecer los vínculos con las agencias locales de monitoreo de peligros y gestión de emergencias para maximizar el impacto local de la ciencia de la**

**zona de subducción**. La comunidad de SZ4D podría beneficiarse significativamente de estar mejor informada sobre las agencias locales, los recursos y la información sobre peligros disponibles para regiones de interés específicas. Para facilitar la comunicación y fortalecer las relaciones, imaginamos talleres y seminarios web realizados en colaboración con expertos locales que analicen los peligros de la región, proporcionen cuentas de eventos de peligros notables anteriores, analicen variaciones geográficas en la exposición y revisen qué datos están disponibles. Específicamente, recomendamos invitar a las agencias locales y a los funcionarios del gobierno, así como a las organizaciones sin ánimo de lucro que trabajan en estas áreas, a hablar sobre las vulnerabilidades de la comunidad ante los peligros y qué nueva información sobre peligros tendría el mayor impacto en la mitigación de riesgos futuros. A medida que la comunidad de SZ4D se vuelve más informada sobre la ubicación, imaginamos que la ciencia de SZ4D evolucionará para priorizar los objetivos que abordan las necesidades locales junto con los méritos intelectuales.

El segundo objetivo es **establecer las mejores prácticas en la comunicación de peligros dentro de comunidades diversas**. Este objetivo va mucho más allá de mejorar la difusión pública y requiere establecer asociaciones entre científicos físicos y sociales, comunicadores científicos, profesionales de organizaciones sin ánimo de lucro que trabajan en el terreno y educadores para desarrollar e implementar técnicas para comunicarse con comunidades diversas sobre los planes y resultados de investigación. Las actividades para satisfacer esta necesidad podrían incluir talleres de formación en comunicación científica con temas como “cómo hablar con el público sobre su ciencia” y “consideraciones para comunicarse con comunidades diversas”. Investigaciones recientes sobre la notificación de alertas tempranas de terremotos al público en general han destacado la importancia de estos esfuerzos (Kamigaichi et al., 2009; Wein et al., 2016; Becker et al., 2020), e indican la necesidad de invitar a científicos sociales y expertos en comunicación a presentar sus

hallazgos en reuniones y conferencias de SZ4D. De manera similar al objetivo anterior, alentamos a cultivar oportunidades de prácticas para profesores, postdoctorandos y estudiantes de posgrado para que trabajen con especialistas en notificación de peligros dentro de comunidades diversas, incluidos comunicadores científicos, investigadores de educación y científicos sociales. La capacidad de comunicar nuestra ciencia de forma eficaz a las comunidades locales para cada proyecto facilitará la incorporación de investigadores e instrumentos a los entornos de campo.

El tercer objetivo es **apoyar la creación de un repositorio de datos de riesgo de acceso abierto** que incluya datos físicos, inventarios de peligros y evaluaciones de vulnerabilidad. Un portal para visualizar la información integrada mejoraría la capacidad de los investigadores de SZ4D para reconocer áreas de alta vulnerabilidad y brechas críticas en la información de peligros. Si bien el desarrollo de este repositorio probablemente va más allá de las capacidades actuales de la comunidad de SZ4D, SZ4D debe aspirar a iniciar su desarrollo a través de la colaboración y la defensoría. Recomendamos colaborar con científicos espaciales para obtener más información sobre la eficacia de los formatos de datos de riesgo, el software y las necesidades de procesamiento. En última instancia, la comunidad de SZ4D debe considerar formas de contribuir a un inventario de peligros completo, que se basaría en la comunicación y la colaboración con las agencias locales.

### Estrategias educativas y de formación

**PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN 3: Se necesitan esfuerzos educativos que sean más inclusivos y tengan resultados de aprendizaje medibles para equipar y diversificar nuestra comunidad científica. ¿Cómo identificamos, desarrollamos e implementamos estas estrategias?**

Un primer objetivo en el esfuerzo educativo de SZ4D es garantizar **que los alumnos estén debidamente equipados con habilidades de investigación específicas de SZ4D**. Hay consenso de que los alumnos deben mejorar:

1. Las habilidades de razonamiento espacial y temporal para manejar conjuntos de datos 4D cada vez más grandes y detallados,
2. La capacidad para trabajar en entornos de trabajo de campo a gran escala, como los despliegues humanos propuestos para recopilar datos críticos de SZ4D, y
3. La capacidad para crear y validar modelos (conceptuales a computacionales) para generar nuevos conocimientos.

SZ4D está preparado para ser un catalizador para promover la ciencia del aprendizaje, que puede mejorarse mediante el apoyo sostenido de las colaboraciones entre científicos físicos e investigadores educativos. Además, reconocemos la necesidad de incorporar más formación técnica (p. ej., codificación o aprendizaje automático) en los planes de estudios existentes (NASEM, 2021) y fomentamos la integración de conjuntos de datos y modelos para desarrollar habilidades críticas en la educación universitaria (Mosher y Keane, 2021; Nyarko y Petcovic, 2022). SZ4D podría energizar esto motivando y facilitando la reevaluación y revisión del plan de estudios existente para satisfacer estas necesidades.

Un segundo objetivo busca **aumentar la integración de la relevancia social de los peligros geológicos en la formación**. Esto se inspira en el esfuerzo a gran escala para incorporar la relevancia social en los materiales y enfoques educativos a través del *proyecto InTeGrate* (Gosselin et al., 2019). InTeGrate creó actividades listas para el aula y revisadas de forma externa por expertos donde los estudiantes trabajan de forma práctica con los complejos desafíos interdisciplinarios en la intersección del sistema terrestre y la sociedad. SZ4D está bien posicionado para crear materiales que se puedan utilizar para enseñar sobre los riesgos de peligros geológicos, con efectos positivos potencialmente grandes, especialmente en comunidades dentro de regiones de zonas de subducción. La exposición de los estudiantes a cómo SZ4D busca abordar los peligros geológicos también tiene el potencial de

inspirar a los estudiantes a perseguir la ciencia SZ4D como parte de su desarrollo profesional. SZ4D debe seguir la estrategia de recopilación, desarrollo, pruebas y difusión demostrada por el proyecto InTeGrate para compartir sus hallazgos científicos a través de nuevos recursos educativos.

Un objetivo final clave es **implementar estrategias educativas eficaces de forma más amplia**. Aunque ha habido un crecimiento considerable de materiales educativos revisados de forma externa por expertos en las últimas dos décadas, los instructores del cuerpo docente aún deben superar los obstáculos para incorporar materiales educativos examinados en su enseñanza (McMartin et al., 2008; McDaris et al., 2019; SERC, 2012). Un camino clave a seguir implica aprender de la investigación realizada sobre el desarrollo profesional de instructores de geociencia (p. ej., Manduca, 2017), lo que indica que debemos buscar métodos para ayudar a los instructores de las facultades a incorporar las mejores prácticas basadas en la evidencia. Esto se puede lograr desarrollando o fomentando la formación de desarrollo profesional para instructores que incluiría un enfoque en las habilidades pedagógicas y la erudición y aprendizaje, además de la formación sobre materiales educativos desarrollados con asociados con la ciencia de SZ4D. SZ4D debe adoptar talleres de desarrollo profesional como medio para difundir nuevos materiales de enseñanza y contribuir a una cohorte de personas informadas y conectadas que puedan defender las mejores prácticas y la erudición y aprendizaje.

## Mejorar la efectividad de la difusión

**PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN 4:** La supervisión de peligros y los esfuerzos de respuesta rápida informan a los responsables de la toma de decisiones a nivel mundial, lo que requiere preparación y canales de comunicación claros. ¿Qué estrategias para la comunicación científica permitirían a las personas comprender mejor los peligros geológicos y los riesgos asociados con ellos?

Para abordar las preguntas de investigación asociadas con la difusión, el primer objetivo es conectar a los **científicos de SZ4D con partes interesadas clave no científicas** utilizando enfoques basados en evidencias para una comunicación científica satisfactoria. Un paso para lograrlo sería apoyar una serie de talleres o una comunidad de práctica, a la que asistan miembros de la comunidad de SZ4D, que se centre en el desarrollo de estrategias de comunicación eficaces. Los materiales para estas formaciones se formularían en cooperación con colaboradores internacionales, grupos sin fines de lucro y científicos que trabajan en la mitigación de peligros y los esfuerzos de respuesta rápida. Una vez finalizado el plan de comunicación, se distribuiría a la amplia comunidad multiinstitucional de SZ4D para su implementación. Un principio general es apoyar los esfuerzos de difusión de manera que sean escalables a grandes poblaciones, sean sostenibles más allá del alcance de un proyecto individual y puedan integrarse con las actividades en curso.

El segundo objetivo es **evaluar los impactos de los esfuerzos de difusión**, con un enfoque particular en las comunidades más afectadas por los peligros de la zona de subducción. Los PI deben dedicar tiempo y esfuerzo para evaluar un proyecto de difusión desde su principio hasta su finalización. La evaluación de los proyectos de difusión podría facilitarse utilizando grupos no gubernamentales sin ánimo de lucro que tengan experiencia con los problemas particulares relacionados con el desarrollo y el despliegue de campañas de difusión. Las evaluaciones iniciales deben centrarse en comprender las fortalezas y debilidades de esfuerzos pasados como EarthScope y GeoPRISMS, incluidos los dirigidos por PI y los iniciados por el personal del centro de SZ4D. La recopilación de información seguida de una revisión crítica podría permitir a SZ4D identificar y aplicar las mejores prácticas de estos enfoques anteriores y evitar algunos de los escollos. Otra necesidad clave es evaluar y evaluar las estrategias de difusión destinadas a aumentar la diversidad. Para abordar esta necesidad, BAJEDI debe invitar a expertos

a compartir estrategias que luego podrían implementarse mediante los esfuerzos de SZ4D.

El tercer objetivo es **crear un único portal que proporcione acceso abierto a recursos de difusión colectiva** que aproveche las plataformas existentes y ampliamente utilizadas sin duplicarlas. Un primer paso para alcanzar este objetivo es definir las necesidades de recursos por parte de los diversos públicos (p. ej., K-12, adultos en general, partes interesadas, residentes en áreas peligrosas). Luego, encuestaremos los recursos existentes y los organizaremos según las necesidades. Para aumentar la probabilidad de que se utilicen los recursos, proporcionaremos descripciones claras de cada recurso e incorporaremos el soporte de implementación esencial (p. ej., clips de video que demuestren el uso). La evaluación de la experiencia del portal a través de encuestas de usuarios nos permitirá realizar mejoras. Además, incentivaremos un modelo de portal en el que los recursos se puedan actualizar rápidamente a medida que se produzcan nuevos eventos.

### Colaboración interdisciplinaria

**PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN 5: ¿Cuáles son las prácticas basadas en la evidencia para la colaboración interdisciplinaria que derriban las barreras y mejoran la comprensión en todas las disciplinas? ¿Cómo puede SZ4D convertirse en un ejemplo de los esfuerzos interdisciplinarios para promulgar relaciones y resultados orientados a la equidad en la ciencia comunitaria?**

El primer objetivo de este conjunto de preguntas de investigación es **decidir colectivamente los objetivos de SZ4D para una colaboración interdisciplinaria exitosa**. BECG identificó un conjunto de objetivos a considerar:

1. Desarrollar nuevas ideas innovadoras y crear nuevos conocimientos,
2. Aumentar las publicaciones con autores de diferentes disciplinas,
3. Aumentar el número de propuestas de subvenciones y proyectos financiados con

PI/coinvestigadores principales (coPI) de diferentes disciplinas,

4. Involucrar disciplinas menos comunes en la investigación de zonas de subducción,
5. Formar a los investigadores en las primeras etapas de su carrera con conocimientos multidisciplinares y conjuntos de habilidades más transferibles, y
6. Compartir metodologías y datos entre diferentes disciplinas.

Una vez establecidos los objetivos colectivos a través de una amplia aportación comunitaria, el segundo objetivo es **incentivar el seguimiento de la información relacionada con los objetivos de colaboración interdisciplinaria**. El proceso de recopilación de datos será importante para investigar si se está progresando. Identificar el proceso específico de recopilación de datos será más claro una vez que se hayan decidido los objetivos. Sin embargo, parece razonable considerar encuestas breves a la comunidad de SZ4D a intervalos regulares, posiblemente durante conferencias o talleres de investigación patrocinados por SZ4D. Una encuesta totalmente en línea enviada a toda la comunidad podría recopilar información de una franja más amplia de participantes. Este es un ejemplo de una estrategia de recopilación de datos de BECG que debe realizarse de forma científicamente ética y responsable. Debe pasar por el proceso de aprobación de una Junta de Revisión Institucional (IRB) para ayudar a garantizar que los resultados sean presentables y publicables.

Un tercer objetivo es **seguir estrategias del trabajo anterior para facilitar una colaboración interdisciplinaria exitosa**. NASEM (2005) ofreció recomendaciones para las categorías de partes interesadas (p. ej., investigadores, postdoctorandos, estudiantes de posgrado, estudiantes universitarios) que proporcionan orientación a SZ4D. Cabe destacar que los líderes del equipo de investigación deben reunir a los colaboradores al principio del proceso para trabajar hacia un acuerdo sobre cuestiones clave y garantizar que los participantes logren

un equilibrio entre contribuir y beneficiarse del equipo. Además de las recomendaciones categóricas, las estructuras de gobernanza de SZ4D deben incluir diversas representaciones y científicos de diferentes disciplinas. La estructura del grupo de trabajo ha adoptado este enfoque, ya que se centra en preguntas de investigación en lugar de en disciplinas específicas.

Un objetivo final es que SZ4D **reconozca las posibles desventajas de la colaboración interdisciplinaria y decida cómo abordar estos problemas**. Algunas de las posibles desventajas (p. ej., Goring et al., 2014) que SZ4D debe abordar son:

1. Un descenso en las publicaciones de primera autoría a corto plazo que puede ser significativamente perjudicial para los investigadores en las primeras etapas de su carrera,
2. Menor “crédito” percibido para publicaciones que tienen listas de autores más largas,
3. Mayor riesgo de proyectos innovadores inspirados en el enriquecimiento mutuo,
4. El mayor tiempo que se tarda en aprender otras disciplinas para tener una transferencia de conocimientos significativa, y
5. La dinámica de poder que puede ocurrir con investigadores en diferentes niveles profesionales.

Aunque sería difícil para SZ4D influir en las estructuras de recompensas actuales en el ámbito académico que se centran en publicaciones de primera autoría, SZ4D puede proporcionar orientación para ayudar a los investigadores en las primeras etapas de su carrera a tomar decisiones sobre colaboraciones interdisciplinarias y cómo mostrar sus resultados positivos si deciden seguirlos (p. ej., Gewin, 2014). En general, SZ4D deberá identificar e implementar estrategias para abordar los problemas de las colaboraciones interdisciplinarias para ser más equitativo.

## **Pertenencia, acceso, justicia, equidad, diversidad e inclusión (BAJEDI)**

**PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN 6:** La diversidad de la comunidad geocientífica se ha quedado rezagada con respecto a otras disciplinas. ¿Qué puede hacer SZ4D en términos de BAJEDI para promulgar un cambio transformador en la comunidad geocientífica? ¿Cómo diseñamos SZ4D para aumentar la inclusividad y la equidad en nuestros esfuerzos científicos? ¿Cómo se puede financiar un proyecto de ciencia comunitaria tan amplio de manera equitativa y promulgar asociaciones que sean mutuamente beneficiosas para todas las partes interesadas?

El primer objetivo de BAJEDI es **capitalizar los cambios demográficos para aumentar el conjunto de estudiantes, profesores y profesionales diversos en geociencia**. Los datos del censo indican claramente la creciente diversidad de la población estadounidense, pero la NSF ha reconocido a las “millones faltantes” de mujeres y minorías de la fuerza laboral de ciencia e ingeniería (NSB, 2020). Del mismo modo, investigaciones recientes han identificado que la diversidad racial en los títulos de doctorado en geociencia no ha aumentado durante varias décadas (Bernard y Cooperdock, 2018). La diversidad racial ha aumentado para los títulos universitarios de geociencia, pero se ha producido en un número muy limitado de instituciones (Beane et al., 2021). Un obstáculo para ampliar la diversidad es la falta de amplio acceso a los programas de geociencia para las poblaciones minoritarias. Una forma en que SZ4D puede ayudar a abordar esta deficiencia es proporcionar oportunidades para que los estudiantes de la institución de servicios a las minorías (MSI) participen en las actividades de SZ4D. Otra opción sería que el cuerpo docente de MSI participara en las actividades de SZ4D que luego podrían compartir con sus estudiantes. Será importante conocer las estrategias de BAJEDI que han tenido éxito en las MSI.

Teniendo en cuenta las opciones que las MSI presentan para involucrar a una comunidad

más diversa en SZ4D, un segundo objetivo es **fomentar la creación de redes/asociaciones mutuamente beneficiosas entre las MSI y las instituciones de investigación involucradas en SZ4D** (NASEM, 2019; NCSES, 2019). Aunque algunas de las instituciones de investigación involucradas en SZ4D son MSI en sí mismas (p. ej., Arizona State University, University of California Santa Cruz, University of California Davis, University of Houston, University of New Mexico, University of Texas El Paso, University of Washington), la mayoría no lo son. Establecer relaciones entre las instituciones de SZ4D y las MSI interesadas tiene el potencial de proporcionar nuevas oportunidades para ambas partes. Sin embargo, forjar nuevas relaciones requiere confianza, por lo que se recomienda el uso de memorandos de entendimiento (MOU) entre departamentos de geociencia en instituciones emparejadas para ayudar a describir los compromisos de trabajar juntos. Los MOU podrían describir la gama de oportunidades que cada institución pretende ofrecer (p. ej., alojamiento, intercambio de información, talleres de formación), junto con el cronograma esperado. Al tratar de desarrollar relaciones con instituciones específicas, SZ4D también debe trabajar con organizaciones científicas centradas en las minorías (p. ej., la Sociedad de Científicos Americanos Chicanos y Nativos Americanos [SACNAS], la Sociedad Nativo Americana de Ciencia e Ingeniería [AISES], la Asociación Nacional de Geólogos Afroamericanos [NABG], GeoLatinas, la Asociación Nacional de Profesores de Geociencia en facultades de 2 años [NAGT2YC]) que pueden proporcionar orientación basada en la experiencia previa y su conocimiento de las comunidades involucradas.

Un tercer objetivo es **promover una ciencia rigurosa cambiando la cultura científica para valorar las perspectivas diversas**. Los estudios demuestran que necesitamos perspectivas diversas para formular y resolver preguntas científicas importantes (p. ej., Powell, 2018). Nos recuerdan que las personas que tienen los medios para participar en la ciencia de SZ4D podrán definir qué preguntas se formulan e investigan. Basándose en estos estudios,

SZ4D debe garantizar que un grupo diverso de científicos participe integralmente en la planificación y las actividades científicas, incluida la investigación financiada, los paneles de revisión y el liderazgo organizativo.

Por último, buscamos **aumentar la educación en geociencia en comunidades diversas**. La investigación revela que la educación científica está relacionada con los usos auténticos de la ciencia en la vida diaria (Feinstein, 2011). Recomendamos que los esfuerzos de difusión de SZ4D apoyen los talleres comunitarios y suministren materiales educativos que proporcionen información sobre los peligros geológicos locales para ayudar a las comunidades minoritarias a comprender los riesgos y a comprometerse más con las geociencias (Basu y Barton, 2007). Este compromiso es importante, ya que las comunidades minoritarias a menudo se ven afectadas de forma desproporcionada por los peligros medioambientales y naturales. La *Alianza EarthConnections* es un ejemplo de un esfuerzo existente sobre el que podríamos construir

### CONEXIONES ENTRE OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN: NECESIDADES Y ACTIVIDADES COMUNES

Las matrices de trazabilidad permitieron a BECG identificar una serie de necesidades y actividades comunes en los diferentes objetivos de la investigación de BECG. Las necesidades que muestran relaciones con el mayor número de objetivos sugieren que deberían ser prioridades de la comunidad de SZ4D y abordarlas tendría el mayor impacto. Del mismo modo, las actividades identificadas con mayor frecuencia para abordar las necesidades deben priorizarse para la inversión de SZ4D. La **Figura BECG-2** destaca las necesidades y actividades identificadas con más frecuencia e ilustra las conexiones clave entre los objetivos, las necesidades y las actividades.

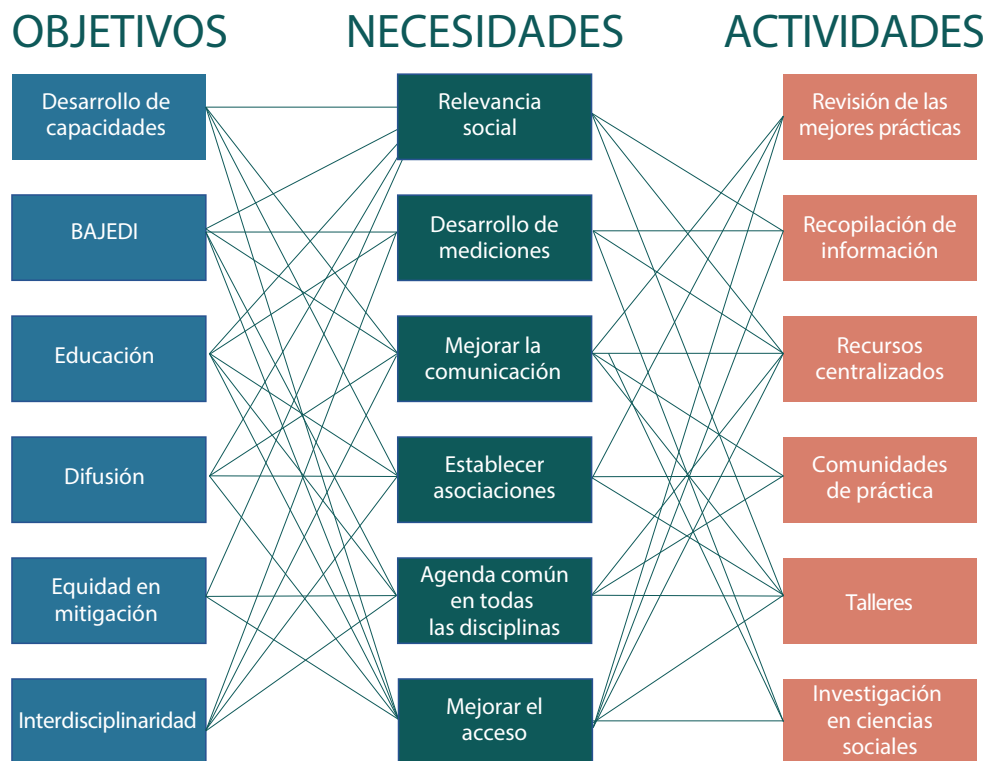
La siguiente sección describe cómo los elementos clave de un modelo de impacto colectivo exitoso satisfacen directamente las necesidades más comunes identificadas por el proceso de matriz de trazabilidad de BECG.

## UN MARCO GENERAL PARA LOGRAR LOS OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN: IMPACTO COLECTIVO

Kania y Kramer (2011) propuso la idea de impacto colectivo (CI), en la que un grupo de personas de diferentes sectores se comprometen a una agenda común para resolver un problema social específico utilizando una forma estructurada de colaboración. La popularidad del CI ha crecido rápidamente (Kania y Kramer, 2013) y ha sido reconocida por el Consejo de la Casa Blanca para Soluciones Comunitarias como un marco importante para el progreso en cuestiones sociales (Jolin, 2012). A diferencia del enfoque colaborativo del CI, el enfoque de impacto aislado se produce con más frecuencia a medida que las entidades individuales intentan tener el mayor impacto con el menor número de recursos. El impacto aislado a menudo es el resultado de que los otorgantes buscan satisfacer un objetivo específico al asignar fondos: apoyar las propuestas que tienen el mayor impacto con menos recursos, dentro de un plazo limitado que no se alinee con el ritmo del cambio institucional típico. Este sistema tradicional produce esfuerzos que a menudo tienen efectos mínimos y duraderos en las comunidades debido a un enfoque a corto plazo en las recompensas y los costes, y motiva a los proponentes a centrarse en distinguir sus esfuerzos de los demás. De hecho, los estudios indican que depender del criterio de impacto más amplio de las propuestas de la NSF para lograr el impacto social es erróneo (Bozeman y Boardman, 2009; Nadkarni y Stasch, 2013). Por lo tanto, sostenemos que las metas y objetivos descritos en este capítulo no pueden lograrse a través de PI de ciencia física que propongan esfuerzos de impacto social individual como

anexos a propuestas centradas principalmente en la investigación de ciencia física. En su lugar, **los PI de SZ4D deben concebirse como que desempeñan un papel en un mayor esfuerzo cooperativo que busca lograr impactos más amplios a largo plazo a través de un marco de CI.** La comunidad SZ4D considera la CI como una oportunidad para un cambio transformador, mejorando nuestra capacidad de crear resultados más sostenibles y positivos para los esfuerzos de educación y difusión y los problemas de BAJEDI dentro de la comunidad geocientífica.

Investigaciones anteriores han demostrado que las iniciativas del CI exitosas normalmente cumplen cinco criterios que juntos producen la alineación necesaria para lograr un progreso significativo y sostenible en cuestiones sociales (Kania y Kramer, 2011). La primera es una **agenda común**, en la que todos los participantes tienen una visión compartida del cambio que incluye una comprensión común del problema y un enfoque conjunto para resolver el problema a través de acciones acordadas. El segundo es un **sistema de medición compartido**, en el que existe un acuerdo sobre las formas en que todas las organizaciones participantes medirán y notificarán el éxito con indicadores clave. El tercero es **actividades de refuerzo mutuo** que involucran a un conjunto diverso de partes interesadas, generalmente en múltiples sectores, en un conjunto de actividades diferenciadas que se combinan para formar un plan de acción coordinado. La cuarta es la **comunicación continua** que implica una interacción frecuente durante largos periodos entre los actores clave dentro y entre las organizaciones para generar confianza y fomentar el aprendizaje y la adaptación continuos. La quinta es una **organización central**, donde el personal independiente proporciona apoyo continuo. El personal central y los voluntarios desempeñan varios papeles para avanzar en la iniciativa: guiar la estrategia para hacer coincidir la visión, apoyar las actividades alineadas, facilitar las prácticas de medición compartidas, crear voluntad pública, avanzar en la política y movilizar la financiación (Turner et al., 2012). Si se pueden cumplir



**Figura BECG-2.** Diagrama que ilustra las conexiones entre los objetivos de investigación de BECG, las necesidades principales y las actividades sugeridas. Las conexiones superpuestas ilustran cómo la implementación de una actividad puede satisfacer varias necesidades y cómo el progreso en una necesidad puede ayudar a varios objetivos.

estos cinco criterios, el resultado satisfactorio observado implica niveles en cascada de colaboración vinculada (**Figura BECG-3**).

Se nos anima a que los esfuerzos del grupo de trabajo e integrador de SZ4D ya hayan progresado en el primer criterio de CI al acordar una agenda común con una visión compartida. Hemos establecido las preguntas de investigación más importantes a través del debate colectivo y luego las examinamos a través de múltiples asambleas generales y reuniones con todas las partes con sectores más grandes de la comunidad de SZ4D. El borrador del proceso de revisión del capítulo, la reunión con todas las partes de junio de 2021 y el proceso de revisión de la propuesta de Catalyst dieron a la comunidad de SZ4D la oportunidad de revisar y proporcionar comentarios sobre el enfoque propuesto de las necesidades definidas y las actividades sugeridas para responder a las preguntas de investigación. Este proceso ha reforzado nuestra comprensión común de la agenda científica de SZ4D y el

apoyo para crear un marco de CI. Los criterios de CI restantes están menos desarrollados en los esfuerzos de SZ4D hasta este punto, pero encontramos una alineación notable entre los criterios de CI y las necesidades críticas identificadas independientemente por BECG (**Figura BECG-2**). Por último, la necesidad de organización central como criterio de CI indica que SZ4D debe estar preparado para apoyar a varios miembros del personal a coordinar y mantener las actividades de BECG.

Debemos tener en cuenta que el CI no es un elixir mágico y que se han realizado varias críticas de este marco (Wolff, 2016; Wolff et al., 2017). En particular, se ha criticado al CI por promover un modelo descendente que no involucra suficientemente a los más afectados por los problemas en la toma de decisiones compartida. Sin embargo, creemos que varios objetivos de BECG abordan este problema centrándose en BAJEDI, las asociaciones internacionales y la inclusión en todas las estrategias para el compromiso con la comunidad. Sin embargo,

las críticas son un recordatorio de que SZ4D, con la orientación de BECG, tendría que estar abierto y disponible para que todos participen e influyan en la dirección.

La implementación de un marco de CI para las actividades de SZ4D ayudará a transformar la mentalidad de nuestra comunidad geocientífica para adoptar la educación, la difusión, el desarrollo de capacidades, la pertenencia, el acceso, la diversidad, la equidad, la inclusión y la justicia social como de vital importancia para el éxito de los esfuerzos científicos de SZ4D.

## PLAN DE IMPLEMENTACIÓN Y FASES

El período abierto de revisión y comentarios para el borrador del plan de implementación en 2021 dio a la comunidad de SZ4D en general la oportunidad de proporcionar comentarios sobre los objetivos, necesidades, actividades y el marco de impacto colectivo propuesto por BECG. BECG también recibió comentarios de la NSF sobre el borrador inicial del informe.

BECG consideró todos los comentarios y los utilizó para ayudar a elaborar un plan de trabajo definido para la implementación que se centrara en cinco áreas con las mayores oportunidades:

1. Establecer y mantener asociaciones con comunidades clave,
2. Guiar comunidades de práctica para el cambio social,
3. Coordinar los esfuerzos internacionales de desarrollo de capacidades existentes y nuevos,
4. Mejorar la educación y la formación fortaleciendo las relaciones entre SZ4D y los socios clave, y
5. “Emparejamiento” entre los PI y los esfuerzos de BECG.

Para organizar las actividades de apoyo proyectadas por tema, cronograma esperado y partes clave de SZ4D responsables del esfuerzo, BECG desarrolló una *hoja de cálculo de fases preliminar*. Esta hoja de cálculo utiliza la fase

descrita en el **Capítulo 5.3**, destacando las actividades de la RCN, las actividades propuestas para un catalizador de dos años Fase 0, y luego estima las actividades para la Fase 1 (1–3 años), Fase 2 (~10 años) y Fase 3 (~5 años). Consulte el **Capítulo 5.4** sobre estructura y gobernanza del programa para obtener detalles sobre las partes clave de SZ4D que serán responsables de lograr la visión de BECG.

### Establecer y mantener asociaciones con comunidades clave

La clave del éxito de SZ4D es establecer asociaciones con organizaciones nacionales e internacionales que monitoreen los peligros naturales, así como con comunidades marginadas que a menudo son las más afectadas por los peligros. Como primer paso, durante la Fase 0, SZ4D se reunirá con el profesorado y los estudiantes de MSI en los campus locales de MSI y más adelante en un taller grupal, con el objetivo de participar en un diálogo mutuamente beneficioso para definir una agenda común para implementar la visión de BECG. En particular, SZ4D necesita aprender de las MSI cómo es BAJEDI en sus instituciones para que otras instituciones SZ4D puedan implementar esas prácticas para aumentar BAJEDI en nuestra comunidad. Conocer a personas en el campus será importante para comunicar el compromiso de SZ4D de establecer relaciones y ofrece oportunidades para simplemente escuchar al personal y profesorado de MSI. El objetivo es que este diálogo conduzca a la participación en el taller y conexiones sostenidas entre el cuerpo docente de MSI y el personal de SZ4D (NASEM, 2019). El taller se diseñará para fomentar una comunicación honesta y sin obstrucciones entre los representantes de MSI y SZ4D (Ballysingh et al., 2017; Gonzales et al., 2021). Se modelará siguiendo las recomendaciones hechas sobre cómo la NSF puede apoyar mejor el desarrollo de capacidades de MSI (ASEE, 2020).

El crecimiento de una red de confianza de socios comunitarios para comunicar regularmente información crítica sobre peligros geológicos es fundamental para un compromiso más amplio de SZ4D. Basándose en la revisión bibliográfica

y el debate con expertos (p. ej., Kozo et al., 2020), **desarrollaremos un modelo de “relevo de socios”, en el que SZ4D se asociará con agencias de gestión de emergencias y una red de organizaciones comunitarias de confianza, incluidas organizaciones sin ánimo de lucro y no gubernamentales que operan localmente y trabajan regularmente con poblaciones objetivo.** Aunque inicialmente consideramos un modelo de difusión más distribuido que formaría a los miembros de la comunidad de SZ4D para comunicarse directamente con el público en general, BECG identificó la experiencia y la investigación que indican que la comunicación científica y la difusión son más exitosas cuando son proporcionadas por organizaciones de confianza (Fischhoff, 2013; Weingart y Guenther, 2016). Por lo tanto, SZ4D se centrará en proporcionar conclusiones clave y mensajes científicos a agencias comunitarias de confianza, que luego transmitirán esta información crítica al público en general. Este enfoque también permitirá a SZ4D lograr un compromiso más orientado a la equidad y estrategias para preparar a las comunidades bilingües y multilingües para los peligros naturales y los riesgos asociados con ellos (Kozo et al., 2020). Basándose en su trabajo inicial, BECG desarrollará una lista priorizada de agencias y organizaciones a las que dirigirse durante la Fase 0 para que SZ4D pueda comenzar a establecer asociaciones. El seguimiento adicional incluirá la identificación de vulnerabilidades clave de la comunidad y la determinación de cómo SZ4D podría transmitir mejor la información a los grupos. Los resultados de estas reuniones se compilarán y compartirán con la comunidad de SZ4D.

Formar a la comunidad de SZ4D sobre las mejores prácticas para la colaboración interdisciplinaria e internacional y la concienciación sobre los problemas de BAJEDI será fundamental para el desarrollo de asociaciones. Por ejemplo, para ayudar a garantizar el éxito de la Reunión Nacional de SZ4D de 2022 en Chile, BECG desarrolló formación sobre competencia cultural y se la ofreció a todos los participantes estadounidenses antes de la reunión. BECG

continuará desarrollando e implementando estas sesiones de formación de forma regular para generar confianza, mantenerse conectados y promover y fomentar el intercambio de recursos, ideas y estrategias inclusivas en todas las asociaciones.

### Guiar comunidades de práctica para el cambio social

Los estudios de los procesos físicos de los peligros geológicos de tierra sólida pueden hacer contribuciones limitadas a la mitigación de riesgos y peligros. Las investigaciones indican que los desastres son resultado de peligros naturales que interactúan con estructuras sociales (p. ej., Kelman, 2018) y que los resultados científicos mal interpretados pueden tener efectos perjudiciales en las comunidades en caso de desastre (p. ej., Albris et al., 2020; Alexander, 2014).

Durante la Fase 0, SZ4D establecerá varias **comunidades de práctica** (CP, es decir, grupos de personas que comparten intereses u objetivos comunes). Cada CP incluirá a personas de su diversa red de disciplinas, instituciones, partes interesadas, comunidades y naciones, aportando múltiples perspectivas para soportar los desafíos a los que se enfrenta SZ4D. Durante la Fase 0, las PC de un año de duración reunirán grupos de científicos físicos y sociales para crear componentes del marco de CI para SZ4D. Las CP se centrarán en tres de los objetivos de la investigación de BECG:

1. BAJEDI,
2. Desarrollo de capacidades, y
3. colaboración interdisciplinaria.

El apoyo de estipendios se utilizará para atraer tanto a expertos en ciencias físicas como en ciencias sociales y para garantizar que los participantes se comprometan a alcanzar los objetivos durante un período de tiempo más largo (Ward y Selvester, 2011). El apoyo financiero también honra la importancia de este trabajo y anima a sus participantes a interactuar entre sí y con el proyecto de formas más intencionadas.

Se supervisará la participación y la evaluación formativa y sumativa de los resultados. Los resultados se presentarán a la dirección de SZ4D para tomar decisiones sobre la implementación de recomendaciones.

#### *Descripciones iniciales de la comunidad de prácticas*

La **CP de BAJEDI** se basará en el taller de MSI para identificar oportunidades para aumentar el grupo de diversos estudiantes, profesores y profesionales en SZ4D (p. ej., Powell, 2018; Hofstra et al., 2020). La CP identificará actividades de refuerzo mutuo para aumentar el acceso a la ciencia de SZ4D para poblaciones infrarrepresentadas. Para reclutar y retener a una comunidad de SZ4D diversa, será fundamental desarrollar estrategias eficaces para comunicar la relevancia de los esfuerzos de BAJEDI a todos los miembros de la comunidad SZ4D. La CP desarrollará rúbricas para evaluar la eficacia de los diversos esfuerzos de BAJEDI en SZ4D, ya que la autoevaluación es crucial para identificar y abordar los problemas de BAJEDI (Velasco et al., 2021).

SZ4D proporciona una oportunidad excepcional para establecer asociaciones internacionales equitativas de desarrollo de competencias para mejorar las capacidades (p. ej., habilidades, datos, tecnología, comprensión) para todas las partes interesadas implicadas. La **CP de desarrollo de capacidades** identificará las actividades de refuerzo mutuo para la investigación de campo internacional cooperativa, el desarrollo de capacidades humanas sostenibles, el desarrollo de infraestructuras técnicas y las políticas de datos e investigación de FAIR (Fecher et al., 2015). Los esfuerzos para minimizar los métodos coloniales de interacción serán centrales, incluido el desarrollo continuo de formación sobre sesgos implícitos interculturales (p. ej., Nordling, 2017; Cartier, 2019). La CP también considerará estrategias para aumentar la adopción y participación en la erudición y aprendizaje para mejorar los esfuerzos de formación. Se desarrollarán medidas para evaluar si los alumnos están debidamente equipados con habilidades específicas de SZ4D en

colaboración con investigadores de educación geocientífica. La CP también se centrará en estrategias de difusión para comprender los peligros geológicos y los riesgos asociados mediante la identificación de actividades de refuerzo mutuo para conectar la ciencia SZ4D con partes interesadas clave no científicas y la evaluación de la efectividad de la difusión con medidas compartidas.

La **CP de colaboración interdisciplinaria** buscará implementar prácticas basadas en evidencias para la colaboración que derriban las barreras disciplinares y mejoran la comprensión en todas las áreas temáticas. La CP establecerá un conjunto de consenso de elementos clave en una colaboración interdisciplinaria exitosa, teniendo en cuenta tanto los costes como los beneficios, y desarrollará métodos para evaluar y mejorar las colaboraciones con SZ4D (Goring et al., 2014). Esto se basará en una revisión de las mejores prácticas y los obstáculos comunes de los esfuerzos comunitarios anteriores que compilaba la RCN de SZ4D, ampliando la investigación sobre la colaboración (Collins et al., 2007; Lenfle y Söderlund, 2019).

Existen **ejemplos recientes convincentes de que SZ4D puede utilizar para modelar su enfoque de CP**. Comité Conjunto para la Comunicación, la Educación, la Divulgación y la Colaboración Técnica (*JCCEO&TE*) del sistema de alerta temprana de terremotos (EEW) ShakeAlert® un esfuerzo internacional vibrante que, a lo largo de seis años, ha reunido un amplio espectro de recursos prácticos, ha abordado preguntas difíciles y ha proporcionado una gran perspectiva de los sistemas sociales inherentes a la mitigación de peligros. Durante el mismo período, la Dirección GEO de la NSF ha patrocinado programas de subvenciones temáticas BAJEDI (GOLD, GOLDEN) para fomentar la diversidad y transformación organizativas y ha requerido cada vez más la inclusión de científicos sociales en los esfuerzos por diversificar la cultura de la ciencia (Posselt et al., 2019). SZ4D seguirá este liderazgo en el reclutamiento y la compensación de expertos en educación superior centrada en la equidad para diseñar los componentes del CI de SZ4D desde las primeras etapas.

### Coordinar los esfuerzos internacionales de desarrollo de capacidades existentes y nuevos

A través de su esfuerzo durante la etapa de la RCN, SZ4D ahora está posicionado para aprovechar, coordinar y complementar las actividades internacionales de desarrollo de capacidades existentes, especialmente aquellas relevantes para un centro de atención sudamericano. Utilizaremos talleres para **reunir a grupos/líderes existentes para identificar similitudes y diferencias en los esfuerzos actuales e identificar brechas donde haya oportunidades para nuevas iniciativas/desarrollos**. SZ4D organizará talleres “adicionales” de un día de oportunidad asociados con reuniones comunitarias establecidas (p. ej., AGU, EGU, GSA, SSA, IUGG, LACSC, SAGE/GAGE). Estas reuniones de oportunidad son una forma eficiente de atraer a nuevos participantes, incluidos los investigadores profesionales iniciales, establecer relaciones con socios internacionales y partes interesadas, compartir experiencias y

planificar/coordinar actividades específicas de desarrollo de capacidades. SZ4D se esforzará por apoyar las opciones de reuniones virtuales para fomentar la participación de grupos que no pueden viajar; esta opción se puso a disposición durante la pandemia de COVID y se utilizó para reuniones de grupos de interés especial con temas sobre la colaboración internacional celebrada en los talleres comunitarios SAGE/GAGE de 2021 (totalmente virtuales) y 2022 (híbridos).

El centro de SZ4D **facilitará reuniones periódicas entre los investigadores principales del proyecto de SZ4D y la gobernanza de SZ4D para priorizar las necesidades y desarrollar oportunidades** para los esfuerzos de desarrollo de capacidades. Las comunicaciones de SZ4D con colaboradores chilenos y argentinos y con otros socios internacionales nos han hecho conscientes de las necesidades y desafíos a los que se enfrentan las partes interesadas locales. Estas relaciones internacionales también proporcionan a la gobernanza de SZ4D una base para coordinar la ejecución del proyecto con PI específicos de SZ4D. La gobernanza de SZ4D cultivará e involucrará a sus contactos tanto en sitios internacionales como nacionales para negociar planes de proyectos sostenibles de PI que maximicen el impacto de su trabajo. SZ4D continuará reforzando el uso de prácticas FAIR en todos los datos y productos de datos de SZ4D, desarrollando modelos desarrollados por IRIS, UNAVCO e IEDA, y extendiéndose a otras comunidades. SZ4D ha ayudado a iniciar conversaciones entre proveedores de datos en Estados Unidos y Chile con este fin.

Un elemento fundamental del desarrollo de capacidades es reunir a las personas para trabajar en el mismo espacio. SZ4D proporcionará **financiación para apoyar los viajes y la coordinación del personal de SZ4D para permitir programas internacionales bidireccionales de intercambio de estudiantes/postdoctorandos**. El enfoque inicial se centrará en el desarrollo de una **red internacional centrada en los peligros geológicos de subducción (SZNet)**, con el objetivo de fomentar un grupo de científicos en las primeras etapas

## Niveles de colaboración en cascada

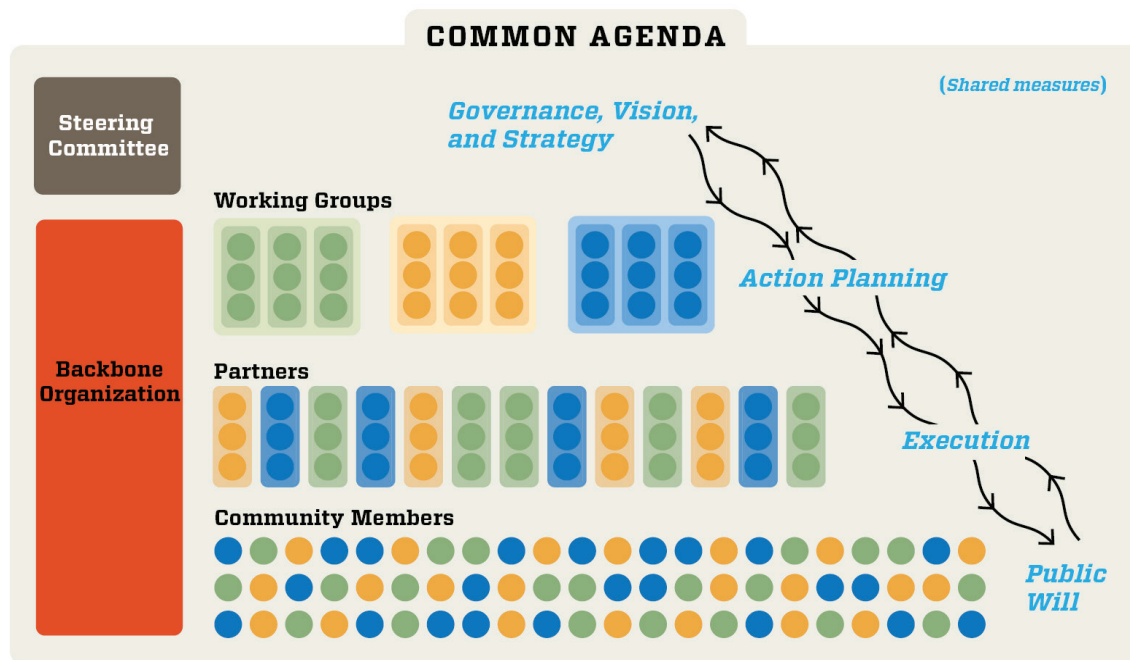


Figura BECG-3. Niveles de colaboración en cascada que se observan con un marco de impacto colectivo exitoso. Figura de Kania y Kramer (2013).

de la carrera profesional que puedan sintetizar información de diferentes zonas de subducción y que tengan un conjunto diverso de contactos internacionales. El programa AccelNet de la NSF puede facilitar la formación internacional y el intercambio de estudiantes y postdoctorandos dentro de SZNet. Esperamos que grupos como SZ4Grads participen en SZNet, así como que conozcan el canal de sus propias redes. La financiación para SZNet permitiría una variedad de actividades, que abarcan colaboraciones de trabajo de campo en persona para viajar a una institución en los Estados Unidos, Chile u otros países que participan en SZNet para llevar a cabo una investigación continua y colaborativa. También se animaría a los PI de SZ4D a considerar diferentes niveles de experiencia, incluidas experiencias de investigación de verano/invierno para estudiantes universitarios, utilizando cohortes de estudiantes y tutoría dedicada, similares en estilo a los programas de prácticas de verano de UNAVCO e IRIS. Estas interacciones se beneficiarán de un énfasis continuo en la formación cultural, el sesgo implícito

y los modelos equitativos de colaboración para evitar las interacciones imperialistas y coloniales (p. ej., Cartier, 2019; Wight, 2021).

Cualquier nueva actividad de desarrollo de capacidades debe **aprovechar los recursos existentes para desarrollar un modelo sostenible** más allá de la expiración de SZ4D. El desarrollo de capacidades ha sido facilitado por una variedad de organizaciones académicas, de supervisión y filantrópicas (p. ej., *IRIS International Development*, *Programa de Asistencia ante Desastres Volcánicos*, *Equipo de Asistencia ante Desastres por Terremotos*, *Geocientíficos sin Fronteras*, *Ingenieros sin Fronteras*) distribuidas en los Estados Unidos e internacionalmente. SZ4D participará con estos grupos para aprender de sus experiencias e, idealmente, colaborar en oportunidades compartidas. En particular, nos gustaría alinearnos mejor y aprender de grupos académicos con los que nuestra comunidad ya está familiarizada, incluido el Observatorio de la Tierra de Singapur y el Centro Internacional de Física Teórica en Trieste, Italia. Además, a

través de la sólida conexión de SZ4D con USGS, aprovecharemos su importante experiencia de su Programa de Asistencia ante Desastres Volcánicos (p. ej., Lowenstern y Ramsey, 2017) y el Equipo de Asistencia ante Desastres por Terremotos para navegar por las complejidades del desarrollo de capacidades en el país con aplicaciones de peligros. A lo largo de este proceso, SZ4D continuará interactuando y aprendiendo de esfuerzos complementarios como el *Grupo de Trabajo de Equidad en Peligros* patrocinado por AGU y *Thriving Earth Exchange*.

Por último, una consideración práctica clave para SZ4D será la **traducción de todos los materiales educativos/de formación asociados** a medida que se desarrollen, para ampliar y maximizar su utilidad. Con un sitio internacional principal en Chile, las traducciones al español y al idioma indígena serán el producto de primer orden y podrán brindar un impacto inmediato a otras partes interesadas en toda América Latina. Este esfuerzo se centrará inicialmente en productos científicos y educativos, como presentaciones científicas o de investigación tópicas, presentaciones de difusión pública, informes de síntesis, materiales de metodología o formación práctica de campo, manuales técnicos y lecciones en clase, y se basará en los recursos existentes (p. ej., SERC, UNAVCO, IRIS). En los casos en los que el material se está desarrollando desde cero, los participantes en lengua nativa reclutados de SZ4grads y de otros lugares podrían recibir apoyo para participar en el desarrollo de contenido educativo y la posterior traducción. Continuaremos estableciendo conexiones en las comunidades de investigación y enseñanza de América Latina para garantizar que nuestros productos tengan aplicaciones significativas y para proporcionar oportunidades de comentarios. También utilizaremos asociaciones con otros grupos internacionales, especialmente aquellos que trabajan en otras partes del mundo en desarrollo y en regiones con procesos de subducción y peligros asociados (p. ej., Indonesia), para determinar la mejor manera de adaptar estos productos a un público más amplio. Según corresponda, trabajaremos con expertos locales para tener en cuenta el contexto cultural y las

normas educativas nacionales en el desarrollo de la pedagogía de formación y para garantizar que cualquier material específico del aula sea adecuado.

### Mejorar la educación y la formación fortaleciendo las relaciones entre SZ4D y los socios clave

Una parte esencial de la misión de SZ4D es compartir libremente sus hallazgos científicos y avances en métodos y tecnologías de investigación, y fomentar y mantener las relaciones recíprocas que construirá dentro de la comunidad de investigación, así como las comunidades donde investiga. SZ4D debe contribuir de forma proactiva a la **educación formal** (en universidades, facultades y escuelas de primaria y secundaria), a la **educación informal (pública) e interpretación** (en museos, centros científicos y parques y reservas), y a la **formación y el desarrollo profesional** de un diverso grupo de científicos y educadores nuevos y experimentados por igual. Muchos en la comunidad de SZ4D ya han acumulado una valiosa experiencia en uno o más de estos ámbitos que pueden ayudar a guiar las estrategias educativas de SZ4D. Sin embargo, hay numerosas organizaciones con esfuerzos educativos continuos con las que SZ4D debería buscar asociarse y coordinarse, incluida la Asociación Nacional de Profesores de Geociencias (NAGT), Asociación Nacional de Profesores de Ciencias de la Tierra (NESTA), Asociación Nacional de Profesores de Ciencias (NSTA), Centro de Investigación en Educación y Ciencias (SERC), y las divisiones educativas de AGU y GSA, así como organizaciones científicas afiliadas como EarthScope Consortium, OpenTopography, Infraestructura Computacional para la Geodinámica (CIG), Sistema de Modelo de Dinámica de Superficie Comunitaria (CSDMS), USGS, Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA), Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA), e investigaciones geológicas e hidrológicas estatales. Durante la primera fase de SZ4D, organizaremos un taller con representantes de estas organizaciones para establecer asociaciones y planificar actividades

con la comunidad de SZ4D. Se animará a los PI y a los instructores a que aporten presentaciones en grandes conferencias regulares y en talleres más pequeños y cursos breves específicamente centrados en la enseñanza y la formación. La coordinación con organizaciones como SERC para la **selección de recursos educativos** también será esencial para garantizar que los esfuerzos persistan más allá del plazo de los proyectos de investigación individuales.

El personal de SZ4D y un conjunto rotativo de PI ofrecerán **institutos de verano tópicos** que se centran en incubar la investigación para abordar las preguntas científicas de SZ4D. Estos institutos se basarán en el modelo exitoso establecido por los programas de verano CIDER. CIDER pone un fuerte énfasis en el trabajo en equipo intensivo en un problema de investigación específico para fomentar la comunicación entre disciplinas y generaciones científicas, al tiempo que proporciona mentoría y nuevas oportunidades de investigación para la próxima generación de científicos de la tierra sólida.

La amplitud de las actividades planificadas de SZ4D también proporciona una oportunidad para investigar las mejores prácticas en educación geocientífica. Se necesitará investigación educativa para evaluar estrategias de formación óptimas para desarrollar:

1. Las habilidades de razonamiento espacial y temporal para manejar conjuntos de datos 4D cada vez más grandes y detallados,
2. La capacidad para trabajar de forma coherente en entornos de trabajo de campo a gran escala, como los despliegues humanos propuestos para recopilar datos críticos de SZ4D, y
3. La capacidad de crear y validar modelos que revelen información nueva esencial. Un programa de ciencias de SZ4D también debe apoyar la investigación complementaria de educación geocientífica que investigue estrategias para mejorar la forma en que equipamos a los estudiantes de SZ4D y a los investigadores postdoctorales.

## “Emparejamiento” entre los PI y los esfuerzos de BECG

El marco de CI de SZ4D facilitará a los científicos que trabajan juntos en todas las disciplinas en lugar de en paralelo en proyectos individuales. Para que este esfuerzo tenga éxito, necesitamos estructuras que fomenten, apoyen y recompensen colaboraciones significativas cuyos esfuerzos abarquen tanto impactos científicos como más amplios.

Todos los talleres de SZ4D tópicos reunirán a participantes de una amplia gama de disciplinas y en varias etapas profesionales. **Cada taller tópico destacará la programación de desarrollo profesional que fomenta enfoques exitosos para el desarrollo y la colaboración del programa de investigación** (p. ej., Youtie y Boseman, 2014). Habrá un enfoque en la asistencia de investigadores en las primeras etapas de su carrera para que podamos reforzar los beneficios de la colaboración interdisciplinaria en una cultura académica que tiende a centrar el valor en resultados de investigación específicos, como publicaciones de primera autoría (Goring et al., 2014). Estableceremos estructuras de tutoría para que estos participantes las aprovechen a medida que desarrollen experiencia disciplinar, pero con vistas a las aplicaciones interdisciplinarias.

Para facilitar la participación del PI en proyectos de impacto más amplios y significativos, necesitamos **crear un sistema en el que los PI puedan ponerse en contacto con SZ4D en la fase de planificación de propuestas para solicitar ayuda en el desarrollo de estrategias de impacto más amplias que se alineen y aprovechen los esfuerzos y recursos existentes de BECG**. El personal de SZ4D puede identificar posibles conexiones, compartir puntos de contacto y facilitar el diálogo. Dado que el personal de SZ4D mantendrá una base de datos de científicos locales y otros posibles colaboradores, podrán ayudar a los PI a establecer conexiones dentro de las áreas de enfoque geográfico. Por ejemplo, la información de solicitud y asistencia recopilada como parte de la reunión nacional de SZ4D de 2022 en Chile

proporciona un punto de partida para que SZ4D establezca conexiones con científicos locales basadas en intereses compartidos.

Al mantener una **base de datos de acceso público que destaca las actividades y colaboraciones, los PI pueden explorar cómo encajan sus esfuerzos en un contexto más amplio.** Para proporcionar una visión precisa de los esfuerzos de BECG, la base de datos de SZ4D debe tratar de incluir actividades financiadas a través de un programa científico de SZ4D y aquellas financiadas por otros programas, agencias y gobiernos relacionados con preguntas de investigación de SZ4D. Esta información se puede recopilar de dos maneras:

1. Las propuestas que soliciten financiación adicional para la investigación estarán supeditadas a proporcionar información sobre los esfuerzos previos, en curso y planificados de BECG, y
2. Todos los participantes del taller deberán proporcionar información sobre sus esfuerzos de BECG con su registro.

Las oportunidades de colaboración presentadas por la base de datos pueden destacarse en las comunicaciones de SZ4D para fomentar la participación.

Aunque otros centros científicos han utilizado elementos de estos enfoques, como el Centro de Terremotos del Sur de California, no tenemos conocimiento de ninguna organización que haya proporcionado mecanismos para fomentar y evaluar los esfuerzos de desarrollo de capacidades colaborativas en este sentido. Para ayudar a garantizar la equidad en esta nueva vía, SZ4D evaluará anualmente el equilibrio de los esfuerzos de impacto más amplios continuos y reclutará esfuerzos de colaboración para actividades críticas y poco representadas. El enfoque del comité, basado en un amplio espectro de la comunidad y las partes interesadas, ofrece una plataforma más amplia para establecer conexiones fuera de los modos tradicionales de colaboración. La intención de SZ4D es que las estrategias de desarrollo de colaboración transformen con éxito la forma en que creamos y mantenemos colaboraciones equitativas que servirán como modelos para futuros esfuerzos dentro de las geociencias.

## REFERENCIAS

- Albris, K., Lauterbach, K.C., & Raju, E. (2020). Disaster knowledge gaps: Exploring the interface between science and policy for disaster risk reduction in Europe. *International Journal of Disaster Risk Science*, 11, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s13753-020-00250-5>
- Alexander, D. (2014). Communicating earthquake risk to the public: The trial of the “L’Aquila Seven.” *Natural Hazards*, 72(2), 1159–1173. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1062-2>
- American Society for Engineering Education (ASEE). (2020). 2020 Conference on Increasing Participation of Minority-serving Institutions in NSF CISE Core Programs: Meeting Report. Washington, DC. [https://aseecmsduq.blob.core.windows.net/aseecmsdev/asee/media/content/member%20resources/pdfs/2020-msi-cise-report\\_1.pdf](https://aseecmsduq.blob.core.windows.net/aseecmsdev/asee/media/content/member%20resources/pdfs/2020-msi-cise-report_1.pdf)
- Ballysingh, T. A., Zerquera, D. D., Turner, C. S., & Sáenz, V. B. (2017). Answering the call: Hispanic-serving institutions as leaders in the quest for access, excellence, and equity in American higher education. *Association of Mexican American Educators Journal*, 11(3), 6–28. <https://doi.org/10.24974/amae.11.3.359>
- Basu, S. J., & Barton, A. C. (2007). Developing a sustained interest in science among urban minority youth. *Journal of Research in Science Teaching*, 44(3), 466–489. <https://doi.org/10.1002/tea.20143>
- Beane, R. J., Baer, E. M. D., Lockwood, R., Macdonald, R. H., McDaris, J. R., Morris, V. R., Villalobos, I. J., & White, L. D. (2021). Uneven increases in racial diversity of US geoscience undergraduates. *Communications Earth & Environment*, 2(1), 126 <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00196-6>
- Becker, J. S., Potter, S. H., Vinnell, L. J., Nakayachi, K., McBride, S. K., & Johnston, D. M. (2020). Earthquake early warning in Aotearoa New Zealand: A survey of public perspectives to guide warning system

- development. *Humanities and Social Sciences Communications*, 7(1), 1–12. <https://doi.org/10.1057/s41599-020-00613-9>
- Bernard, R. E., & Cooperdock, E. H. (2018). No progress on diversity in 40 years. *Nature Geoscience*, 11(5), 292–295. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0116-6>
- Boeckhout, M., Zielhuis, G. A., & Bredenoord, A. L. (2018). The FAIR guiding principles for data stewardship: Fair enough?. *European Journal of Human Genetics*, 26(7), 931–936. <https://doi.org/10.1038/s41431-018-0160-0>
- Bozeman, B., & Boardman, C. (2009). Broad impacts and narrow perspectives: Passing the buck on science and social impacts. *Social Epistemology*, 23(3–4), 183–198. <https://doi.org/10.1080/02691720903364019>
- Cartier, K. M. S. (2019). Keeping indigenous science knowledge out of a colonial mold. *Eos*, 100 <https://doi.org/10.1029/2019EO137505>
- Collins, H., Evans, R., & Gorman, M. (2007). Trading zones and interactional expertise. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 38(4), 657–666. <https://doi.org/10.1016/j.shpsa.2007.09.003>
- Cox, M. D. (2004). Introduction to faculty learning communities. *New Directions for Teaching and Learning*, 2004(97), 5–23. <https://doi.org/10.1002/tl.129>
- Fecher, B., Friesike, S., & Hebing, M. (2015). What drives academic data sharing? *PLoS ONE*, 10(2), e0118053. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118053>
- Feinstein, N. (2011). Salvaging science literacy. *Science Education*, 95(1), 168–185. <https://doi.org/10.1002/sce.20414>
- Fischhoff, B. (2013). The sciences of science communication. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(supplement\_3), 14033–14039. <https://doi.org/10.1073/pnas.1213273110>
- Gewin, V. (2014). Interdisciplinary research: Break out. *Nature*, 511(7509), 371–373. <https://doi.org/10.1038/nj7509-371a>
- Gonzales, L. D., Hall, K., Benton, A., Kanhai, D., & Núñez, A. M. (2021). Comfort over Change: A Case Study of Diversity and Inclusivity Efforts in US Higher Education. *Innovative Higher Education*, 46(4), 445–460. <https://doi.org/10.1007/s10755-020-09541-7>
- Goring, S. J., Weathers, K. C., Dodds, W. K., Soranno, P. A., Sweet, L. C., Cheruvilil, K. S., Kominoski, J. S., et al. (2014). Improving the culture of interdisciplinary collaboration in ecology by expanding measures of success. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 12(1), 39–47. <https://doi.org/10.1890/120370>
- Gosselin, D. C., Egger, A. E., & Taber, J. J. (Eds.). (2019). *Interdisciplinary teaching About Earth and the environment for a sustainable future*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-03273-9>
- Hofstra, B., Kulkarni, V. V., Munoz-Najar Galvez, S., He, B., Jurafsky, D., & McFarland, D. A. (2020). The diversity-innovation paradox in science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(17), 9284–9291. <https://doi.org/10.1073/pnas.1915378117>
- Jolin, M. (2012). Needle-moving community collaboratives: A promising approach to addressing America's biggest challenges. Bridgespan Group.
- Kamigaichi, O., Saito, M., Doi, K., Matsumori, T., Tsukada, S. Y., Takeda, K., Shimoyama, T., et al.. (2009). Earthquake early warning in Japan: Warning the general public and future prospects. *Seismological Research Letters*, 80(5), 717–726. <https://doi.org/10.1785/gssrl.80.5.717>
- Kania, J., & Kramer, M. (2011). Collective impact. *Stanford Social Innovation Review*, Invierno de 2011, 36–41.
- Kania, J., & Kramer, M. (2013). Embracing emergence: How collective impact addresses complexity. *Stanford Social Innovation Review*, Enero 2013, 1–7.
- Kelman, I. (2018). Lost for words amongst disaster risk science vocabulary? *International Journal of Disaster Risk Science*, 9(3):281–291. <https://doi.org/10.1007/s13753-018-0188-3>
- Kozo, J., Wooten, W., Porter, H., & Gaida, E. (2020). The Partner Relay Communication Network: Sharing information during emergencies with limited English proficient populations. *Health Security*, 18(1), <https://doi.org/10.1089/hs.2019.0144>
- Lenfle, S., & Söderlund, J. (2019). Large-scale innovative projects as temporary trading zones: Toward an inter-language theory. *Organization Studies*, 40(11), 1713–1739. <https://doi.org/10.1177/0170840618789201>

- Lowenstern, J. B., & Ramsey, D. W. (2017). The Volcano Disaster Assistance Program—Helping to save lives worldwide for more than 30 years (No. 2017-3071). US Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/fs20173071>
- Manduca, C. A. (2017). Surveying the landscape of professional development research: Suggestions for new perspectives in design and research. *Journal of Geoscience Education*, 65(4), 416–422. <https://doi.org/10.5408/17-281.1>
- Manduca, C. A., Iverson, E. R., Luxenberg, M., Macdonald, R. H., McConnell, D. A., Mogk, D. W., & Tewksbury, B. J. (2017). Improving undergraduate STEM education: The efficacy of discipline-based professional development. *Science Advances*, 3(2), e1600193. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600193>
- McDaris, J. R., Iverson, E. R., Manduca, C. A., & Orr, C. H. (2019). Teach the Earth: Making the connection between research and practice in broadening participation. *Journal of Geoscience Education*, 67(4), 300–312. <https://doi.org/10.1080/10899995.2019.1616272>
- McGuire, J.J., T. Plank, et al. (2017). *The SZ4D Initiative: Understanding the processes that underlie subduction zone hazards in 4D*. Vision document submitted to the National Science Foundation. The IRIS Consortium, 63 pp.
- McMartin, F., Iverson, E., Wolf, A., Morrill, J., Morgan, G., & Manduca, C. (2008). The use of online digital resources and educational digital libraries in education. *International Journal on Digital Libraries*, 9(1). <https://doi.org/10.1007/s00799-008-0036-y>
- Mosher, S., & Keane, C. (Eds.) (2021). Vision and change in the geosciences: The future of undergraduate geoscience education. <https://www.americangeosciences.org/change/> [doi.org/10.1130/abs/2020AM-355429](https://doi.org/10.1130/abs/2020AM-355429)
- Nadkarni, N. M., & Stasch, A. E. (2013). How broad are our broader impacts? An analysis of the National Science Foundation's Ecosystem Studies Program and the broader Impacts requirement. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(1), 13–19. <https://doi.org/10.1890/110106>
- NASEM (National Academy of Sciences, National Academy of Engineering, and Institute of Medicine). (2005). *Facilitating Interdisciplinary Research*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/11153>
- NASEM. (2019). *Minority Serving Institutions: America's underutilized resource for strengthening the STEM workforce*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25257>
- NASEM. (2021). Quantitative skills for solid Earth geophysics – Scoping meeting. <https://www.nationalacademies.org/our-work/quantitative-skills-for-solid-earth-geophysics-scoping-meeting>
- NCSES (National Center for Science and Engineering Statistics). (2019). Women, minorities, and persons with disabilities in science and engineering. <https://ncses.nsf.gov/pubs/nsf19304/>
- Nordling, L. (2017). San people of Africa draft code of ethics for researchers. *Science*, 17 <https://doi.org/10.1126/science.aal0933>
- NSB (National Science Board). (2020). Vision 2030. Alexandria, VA: The National Science Board. <https://www.nsf.gov/nsb/publications/2020/nsb202015.pdf>
- Nyarko, S.C. & H. L. Petcovic (2022): Essential teamwork skills: Perspectives of environmental geoscience employers. *Journal of Geoscience Education*, <https://doi.org/10.1080/10899995.2022.2044665>
- Posselt, J. R., Chen, J., Dixon, P. G., Jackson, J. F. L., Kirsch, R., Nuñez, A.-M. & Teppen, B. J. (2019). Advancing inclusion in the geosciences: An overview of the NSF-GOLD program. *Journal of Geoscience Education*, 67(4), 313–319. <https://doi.org/10.1080/10899995.2019.1647007>
- Powell, K. (2018). These labs are remarkably diverse--here's why they're winning at science. *Nature*, 558(7708), 19–23. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-05316-5>
- SERC (Science Education Resource Center). (2012). Activity design: Questions to consider when designing or reviewing an activity. [http://serc.carleton.edu/NAGTWorkshops/servicelearning/workshop10/activity\\_design/index.html](http://serc.carleton.edu/NAGTWorkshops/servicelearning/workshop10/activity_design/index.html) (See also [https://serc.carleton.edu/teachearth/activity\\_review.html](https://serc.carleton.edu/teachearth/activity_review.html))
- Sherer, P. D., Shea, T. P., & Kristensen, E. (2003). Online communities of practice: A catalyst for faculty development. *Innovative Higher Education*, 27(3), 183–194.
- Shipley, T., Davatzes, A., Lombardi, D., LaDue, N. (2016). Understanding and promoting spatial learning processes in the geosciences. [https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD\\_ID=1640800](https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=1640800)

- Stefanoudis, P. V., Licuanan, W. Y., Morrison, T. H., Talma, S., Veitayaki, J., & Woodall, L. C. (2021). Turning the tide of parachute science. *Current Biology*, 31(4), R184–R185. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.01.029>
- Tenopir, C., Allard, S., Douglass, K., Aydinoglu, A. U., Wu, L., Read, E., Manoff, M., & Frame, M. (2011). Data sharing by scientists: practices and perceptions. *PLoS ONE*, 6(6), e21101. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0021101>
- Till, C. B., Anbar, A., & Hannah, M. (2017). The role of social sciences and humanities in facilitating interdisciplinary science in future subduction zone research efforts. The SZ4D Initiative vision document submitted to the National Science Foundation. The IRIS Consortium, WP57.
- Turner, S., Merchant, K., Kania, J., & Martin, E. (2012). Understanding the value of backbone organizations in collective impact: Part 2. *Stanford Social Innovation Review*, (Julio del 18).
- Velasco, A. A., Aderhold, K., Alfaro-Diaz, R., Brown, W., Brudzinski, M. R., Fraiser, Holt, M. M., et al. (2021). SSA Task Force on Diversity, Equity, and Inclusion: Toward a changing, inclusive future in earthquake science. *Seismology Research Letters*, 92 (5), 3267–3275. <https://doi.org/10.1785/0220210170>
- Ward, H. C., & Selvester, P. M. (2011). Faculty learning communities: Improving teaching in higher education. *Educational Studies*, 38(1), 111–121. <https://doi.org/10.1080/03055698.2011.567029>
- Wein, A., Potter, S., Johal, S., Doyle, E., & Becker, J. (2016). Communicating with the public during an earthquake sequence: Improving communication of geoscience by coordinating roles. *Seismological Research Letters*, 87(1), 112–118. <https://doi.org/10.1785/0220150113>
- Weingart, P., & Guenther, L. (2016). Science communication and the issue of trust. *Journal of Science Communication*, 15(5). <https://doi.org/10.22323/2.15050301>
- Wight, A. J. (2021), Why aren't there more journal papers by African geoscientists? *Eos*, 102 <https://doi.org/10.1029/2021EO154774>
- Williams-Stroud, S. (2021). Seeking diversity in the geosciences when Black lives matter. *GSA Today*, 31(2), 28–29. <https://doi.org/10.1130/GSATG476GW.1>
- Wilkinson, M. D., Dumontier, M., Aalbersberg, I. J., Appleton, G., Axton, M., Baak, A., Blomberg, N. et al. (2016). The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data*, 3, 160018 <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>
- Wolff, T. (2016). Ten places where collective impact gets it wrong. *Global Journal of Community Psychology Practice*, 7(1), 1–13.
- Wolff, T., Minkler, M., Wolfe, S. M., Berkowitz, B., Bowen, L., Butterfoss, F. D., & Lee, K. S. (2017). Collaborating for equity and justice: Moving beyond collective impact. *Nonprofit Quarterly*, 9, 42–53.
- Youtie, J., & Bozeman, B. (2014). Social dynamics of research collaboration: Norms, practices, and ethical issues in determining co-authorship rights. *Scientometrics*, 101(2), 953–962. <https://doi.org/10.1007/s11192-014-1391-7>

# MODELADO COLABORATIVO PARA LA SUBDUCCIÓN

## HACIA UN MARCO COMUNITARIO INTEGRADOR PARA MODELOS DE ZONAS DE SUBDUCCIÓN

El modelado colaborativo para la subducción (MCS) es un esfuerzo de creación de comunidades y modelos para avanzar en la ciencia de la zona de subducción. El grupo de MCS se concibió como un componente principal de la iniciativa de Zonas de Subducción en Cuatro Dimensiones (SZ4D) en el *informe de observatorios de la zona de subducción de Boise* (McGuire et al., 2017). Dado el alcance novedoso y ambicioso de MCS y SZ4D, sus esfuerzos de planificación se financiaron posteriormente como RCN independientes. En abril de 2022, las RCN de MCS y SZ4D se unieron oficialmente bajo el marco general de SZ4D, y MCS se convertirá en una de las instalaciones y actividades principales de SZ4D. La RCN de MCS apoyó una serie de debates

de talleres comunitarios que se resumen en informes detallados de talleres (Wada et al., 2019; Dunham et al., 2020; Wada y Karlstrom, 2020; Gonnermann et al., 2021). En este capítulo se destacan los puntos clave que surgieron de estos talleres, la planificación de los esfuerzos junto con los grupos de trabajo e integradores de SZ4D y las amplias discusiones comunitarias. Específicamente, este capítulo se centra en la estructura y la implementación de MCS; los objetivos científicos detallados del grupo de MCS se entrelazan en los capítulos individuales del grupo de trabajo.

El objetivo de MCS es crear nuevos tipos de modelos basados en la física para los peligros de la zona de subducción y aplicarlos para

comprender los procesos físicos fundamentales, guiar los despliegues de instrumentación, interpretar las observaciones y evaluar la previsibilidad de los peligros. Específicamente, las actividades de MCS se desarrollarán en torno a los siguientes objetivos generales:

- Construir modelos que vinculen el estado de la zona de subducción y la evolución del margen a largo plazo con el carácter y la previsibilidad de la ocurrencia del evento.
- Integrar las restricciones de observación en los modelos, al tiempo que se utilizan modelos para definir estrategias de observación óptimas.
- Crear modelos predictivos basados en la física para los sistemas de volcanes, terremotos y geomórficos que están acoplados espacial y temporalmente.
- Crear una comunidad diversa y equitativa de académicos que conozcan bien las herramientas de modelado modernas.

A un nivel más granular, el grupo MCS trabajará para abordar las preguntas científicas planteadas por los grupos de trabajo de SZ4D. Los capítulos individuales del grupo de trabajo describen las herramientas de modelado necesarias para lograr sus objetivos e identificar áreas específicas en las que se necesitarán aportes de MCS para el éxito.

Desde el principio, MCS integrará el modelado y el descubrimiento basados en la física en los esfuerzos de observación y de laboratorio de SZ4D, en lugar de seguir la secuencia más típica en la que el modelado se utiliza solo después de la recopilación de datos. De esta manera, se empleará el modelado no solo para interpretar conjuntos de datos, sino también para planificar y diseñar despliegues de observación. A medida que las nuevas observaciones entran en línea, los flujos de datos se asimilarán en modelos para evaluar el “estado” de los sistemas de Megathrust y volcánicos, reconociendo que los procesos a largo plazo y el contexto geológico/geofísico pueden desempeñar papeles clave en la conformación de las rupturas individuales o

los eventos eruptivos. MCS empleará modelos contiguos y enfoques de aprendizaje automático e inteligencia artificial habilitados para la física que aprovechen plenamente los nuevos conjuntos de datos que se recopilan. De esta manera, buscamos transformar la forma en que se llevan a cabo los programas de la tierra a gran escala y mejorar lo que pueden lograr en términos de avances en la ciencia de los sistemas de la tierra sólida.

En el contexto de MCS, la “creación de modelos” es un medio para validar nuevas descripciones físicas, hacer predicciones basadas en enfoques teóricos simplificados y desarrollar modelos numéricos que se pueden utilizar para explorar el papel general y las interacciones de los procesos fundamentales en el control del comportamiento del sistema (es decir, para el descubrimiento basado en la física de fenómenos emergentes). El modelado numérico también se puede integrar con experimentos de laboratorio o modelos físicos analógicos para facilitar la ampliación de los resultados de laboratorio a sistemas naturales a gran escala.

Además, MCS busca construir modelos más complejos, “aplicados” y regionalmente “realistas” que puedan asimilar completamente la información estructural (p. ej., de imágenes geofísicas y geología) y los flujos de datos de sensores dependientes del tiempo (p. ej., de sismómetros y sensores geodésicos) de observatorios de zonas de subducción globales (**Figura MCS-1**). Una nueva dirección emocionante en este sentido es el desarrollo de modelos contiguos basados en modelos físicos de orden completo o reducido, así como técnicas de aprendizaje automático habilitadas por la física, cuya combinación tiene el potencial de informar evaluaciones de peligros en tiempo real junto con inversiones más tradicionales de datos de sensores múltiple.

Dichos nuevos enfoques son necesarios para interpretar de forma coherente las limitaciones en el funcionamiento general de los terremotos, volcanes y procesos superficiales en las zonas de subducción; para identificar brechas de conocimiento en nuestros modelos físicos; y

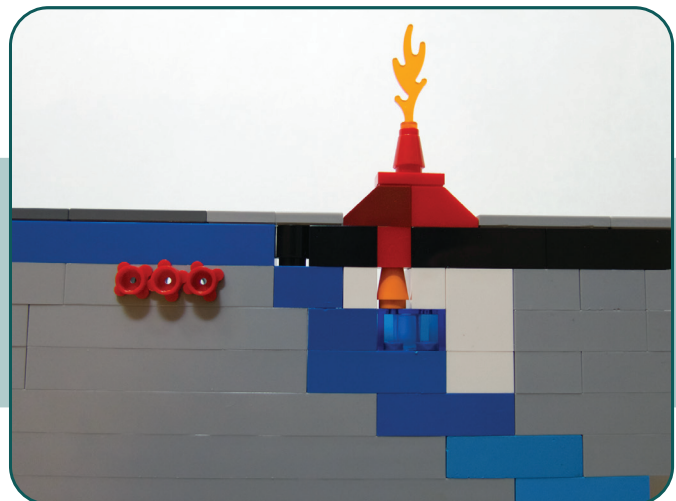
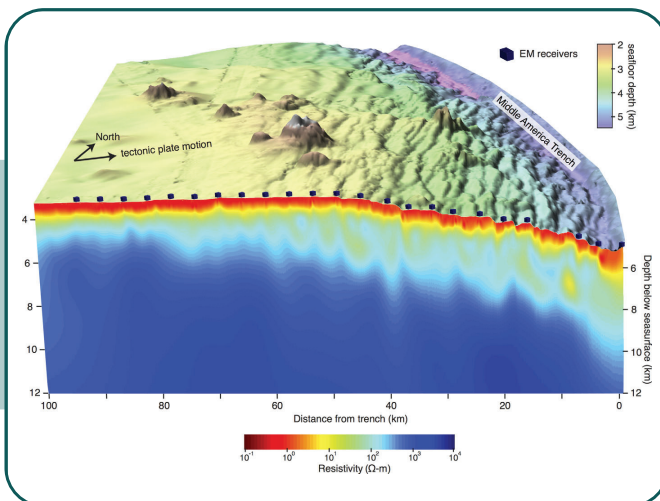
para definir estrategias de observación óptimas para reducir las dudas. La construcción de las herramientas pertinentes requerirá amplios esfuerzos de validación y verificación, que tienen el beneficio adicional de impulsar los estándares cuantitativos para el modelado y la inversión en la ciencia de terremotos y volcanes, en general (p. ej., SCEC). En la escala de tiempo decadal, MCS conducirá a los nuevos enfoques científicos y operativos fundamentales que se necesitan para cuantificar y posiblemente la previsión de los peligros de terremotos, tsunami, deslizamientos de tierra y volcánicos.

El modelado previsto por MCS se avanzará a través del ambicioso plan de SZ4D para una nueva infraestructura de observación en Chile y centros complementarios en Cascadia y Alaska. Los nuevos flujos de datos de MegaArray, VolcArray y SurfArray se utilizarán para informar y probar modelos, lo que conduce a un mayor refinamiento del modelo y posiblemente a la incorporación de procesos físicos adicionales. Además, está claro que las zonas de subducción en la Tierra son diversas en términos de su configuración tectónica y/o etapa actual dentro de sus ciclos volcánicos o sísmicos. Para impulsar la ciencia de la zona de subducción, es por lo tanto imperativo integrar también las

observaciones de otros laboratorios regionales fuera de los centros de enfoque principal de SZ4D para llegar a una comprensión física validada globalmente.

MCS está concebido como una nueva instalación principal de SZ4D que puede servir para apoyar el desarrollo de dicho marco y proporcionar un hogar para interacciones sostenidas entre modeladores, experimentalistas y observacionalistas. Los esfuerzos sostenidos son cruciales porque aún no sabemos cómo ensamblar modelos completos de terremotos, volcanes y deslizamientos de tierra. MCS puede proporcionar y asimilar bloques de construcción para probar descripciones físicas alternativas e identificar los procesos más importantes para controlar el comportamiento del sistema, proporcionando la unión entre estudios de zonas de subducción a través del tiempo geológico y la actividad actual. Además, MCS puede apoyar a las comunidades de investigación de la zona de subducción global, incluidas las partes interesadas locales, así como a los observatorios internacionales y nacionales en diferentes etapas de su implementación, ayudando a apoyar las colaboraciones interdisciplinarias y entre centros. La validación cruzada basada en modelos es necesaria para vincular cuantitativamente la

**Figura MCS-1.** Concepto de un marco modular basado en bloques de construcción para el modelado basado en la física proporcionado por el MCS para explorar los procesos físicos generales y crear modos de zonas de subducción regionales específicos, por ejemplo, para interpretar datos de sensores en tiempo real para el "estado" del sistema. Izquierda: Estructura de conductividad eléctrica para Centroamérica (de Naif et al., 2015).



información del observatorio chileno, así como otros esfuerzos internacionales, a los entornos de riesgo y peligro de preocupación social nacional para los Estados Unidos.

Además, aunque cualquier estudio exitoso de zonas de subducción requiere una apreciación de su diversidad física y geológica, también requiere reconocer la importancia de fomentar una comunidad científica diversa para realizar estos estudios. MCS presenta una nueva oportunidad para ayudar a establecer enfoques computacionales como vías de entrada alternativas para las comunidades marginadas y subrepresentadas en las geociencias. Estos esfuerzos complementarán los esfuerzos de formación y construcción de comunidades más tradicionales para capacitar a los científicos informáticos con las herramientas interdisciplinarias que necesitan para tener éxito. Junto con los amplios esfuerzos de difusión y enseñanza (p. ej., para mejorar la educación cuantitativa en estudiantes de primaria y secundaria y estudiantes universitarios), MCS y las geociencias computacionales, en general, pueden contribuir en gran medida a los esfuerzos para construir una comunidad mejor y más diversa de geocientíficos. Este importante tema se explora con más detalle en el capítulo de BECG. MCS desempeñará un papel importante en el inicio y el apoyo de los esfuerzos de pertenencia, accesibilidad, justicia, equidad, diversidad e inclusión (BAJEDI) dentro de SZ4D, así como en la asociación con esfuerzos alineados como la Infraestructura Computacional para la Geodinámica (CIG), el Sistema de Modelado y Dinámica de Superficie Comunitaria (CSDMS) y el Instituto Cooperativo para la Investigación Dinámica de la Tierra (CIDER) a nivel nacional e internacional.

## OBJETIVOS DE DISEÑO DE MCS DEFINIDOS POR LA COMUNIDAD

A través de los talleres y el compromiso con la comunidad patrocinados por la RCN de MCS, se definieron objetivos de diseño clave para que MCS lograra los objetivos de guía descritos anteriormente. La comunidad hizo hincapié en la necesidad de crear nuevas vías para el descubrimiento, basadas en inversiones en infraestructura humana y computacional y que estén respaldadas a lo largo de plazos más largos que un ciclo de becas típico. Los informes del taller de RCN de MCS describen estos objetivos de diseño definidos por la comunidad con gran detalle. Aquí, destacamos los temas comunes que se cristalizaron de estas discusiones comunitarias entre observacionistas, experimentalistas y modeladores. Específicamente, la comunidad recomienda que MCS:

- Apoye el desarrollo de nuevos modelos futuros basados en la física para estudiar los peligros geológicos asociados con las zonas de subducción. El desarrollo de modelos en estos esfuerzos debe guiarse por los objetivos científicos de los grupos de trabajo de SZ4D con prioridades definidas por los aportes de la comunidad.
- Apoyar el intercambio sostenido entre científicos de la zona de subducción computacional, de observación y de laboratorio dentro de SZ4D y la comunidad más amplia a través de talleres, hackatones y construcción de modelos compartidos. Específicamente, este intercambio científico puede realizarse a través de grupos de investigación regionales y centrados en los procesos.
- Apoyar el desarrollo de herramientas de marco de modelado y modelos y los ejercicios de validación/verificación, con una combinación de enfoques centralizados y distribuidos, basados en la orientación y la aportación continua de la comunidad, y apoyar tanto el desarrollo de código

basado en la comunidad e impulsado por PI, así como los esfuerzos de marco centralizados.

- Apoyar la documentación y facilidad de uso de los códigos a través de tutoriales, planes detallados y ejemplos de flujo de trabajo para permitir el uso de modelos para aplicaciones de enseñanza e investigación.
- Apoyar las operaciones de SZ4D almacenando y difundiendo productos derivados de datos, como modelos estructurales comunitarios, y servir como repositorio para herramientas de modelado inverso y futuro y análisis de datos de todas las disciplinas involucradas en SZ4D.
- Apoyar el acceso a recursos informáticos, que empoderarán a los científicos con diferentes orígenes y apoyo institucional, y ampliar y democratizar la participación en informática de vanguardia, basada en datos, de alto rendimiento y en la nube dentro de las ciencias de la tierra sólida.

Mientras se esfuerza por alcanzar estos objetivos, MCS debe guiarse estratégicamente por principios como:

- Proporcionar códigos de código abierto validados, flexibles, robustos, bien documentados y eficientes con consideración inherente de los enfoques multifísica, a escala cruzada, conjuntos y la cuantificación de la incertidumbre.
- Adoptar los principios rectores de la ciencia abierta y las prácticas de datos FAIR (encontrabilidad, accesibilidad, interoperabilidad y reusabilidad) con formatos de salida estandarizados.
- Potenciar la representación más amplia y diversa de la comunidad, la representación equitativa de todas las voces y apoyar la colaboración internacional activa.

Para muchos problemas se necesita una gama de enfoques alternativos, posiblemente competitivos, de modelado. Por lo tanto, cuando sea posible, MCS debe admitir flujos

de trabajo modulares (**Figura MCS-1**) en lugar de un único enfoque de “consenso” sobre cómo se debe modelar la física de la subducción. Los componentes del modelo se pueden verificar y comparar primero para garantizar que los códigos aborden los componentes del subsistema implicados en los problemas multiescala y multifísicos acoplados de forma correcta y eficiente. Avanzando hacia la validación (es decir, garantizar que las representaciones físicas generales, los modelos de subducción acoplados, sean los adecuados), los códigos deben simular las interacciones en todas las escalas y explorar los procesos físicos acoplados. Para ello, el marco más general debe analizarse lo más ampliamente posible tanto en los centros de SZ4D como mediante la integración de datos de diferentes zonas de subducción regionales, experimentos de laboratorio y otros laboratorios naturales.

Por último, para tener éxito, MCS debe garantizar una estrecha colaboración entre expertos en matemáticas computacionales y aplicadas y científicos con dominio, así como un intercambio cercano entre modeladores, experimentales y observacionalistas. Este último incluye el apoyo al modelado y la construcción de modelos por parte de los observacionalistas y la apreciación del análisis de datos y los experimentos de laboratorio por parte de los modeladores, con el espíritu de potenciar la investigación interdisciplinaria.

En resumen, MCS debe servir como una instalación científica computacional para SZ4D, proporcionando las herramientas más versátiles posibles mientras se persigue el objetivo de crear modelos físicos para los peligros de la zona de subducción. Por supuesto, MCS no actuará de forma aislada. Los objetivos científicos se superponen con varias agencias (NSF, USGS, NASA, NOAA) y organizaciones comunitarias (p. ej., CSDMS, CIG, Herramientas y Recursos del Centro de Volcanología para la Colaboración Interdisciplinaria [VICTOR]), y centros de terremotos existentes y posibles futuros en los Estados Unidos. También hay vínculos claros con varios socios internacionales, como el Centro de Excelencia en Tierra Sólida (ChEESE), una iniciativa para acercar los códigos habilitados para la computación de alto

rendimiento (HPC) de tierra sólida de vanguardia a las aplicaciones de peligros. MCS se esforzará por trabajar en colaboración dentro de este conjunto de centros computacionales, aprovechando la infraestructura existente, mientras intenta no duplicar los esfuerzos.

## CÁLCULO BASADO EN DATOS

MCS es el hogar natural de SZ4D para enfoques computacionales basados en datos, como el aprendizaje profundo y otros métodos de aprendizaje automático (ML) que han visto aplicaciones de geociencia significativas en los últimos años. Estos avances son relevantes para todos los componentes de SZ4D y tienen utilidad para los investigadores que trabajan con datos y modelos geofísicos, geoquímicos, geológicos y experimentales. La experiencia combinada de MCS en computación basada en la física y basada en datos garantizará un enfoque integral de los esfuerzos de modelado y análisis de datos de SZ4D. SZ4D aprovechará las técnicas de ML existentes y desarrollará nuevos enfoques de ML en sus esfuerzos de asimilación y modelado de datos. Específicamente, MCS utilizará ML de las siguientes maneras:

1. Las canalizaciones del procesamiento de datos de ML son expertas en detección de eventos y señales, asociación, ubicación e interpretación automatizada. MCS creará y utilizará estos flujos de trabajo para analizar los datos en tiempo real recopilados de la instrumentación terrestre y marina. Dicha información puede aprovecharse para determinar las distribuciones de sismicidad y la estructura de fallas, así como obtener imágenes de los sistemas de canalización de magma y el transporte de magma transcortical. MCS también explorará la eliminación de ruido habilitada por ML, que se espera que sea importante para los datos de los sismómetros del fondo del océano, la geodesia de alta velocidad y otros flujos de datos con ruido como las emisiones de gas volcánico.

2. Los flujos de trabajo habilitados para ML se pueden aplicar para procesar rápidamente y reducir los datos multiparámetros de MegaArray, SurfArray y VolcArray en tiempo real para un análisis de datos rápido basado en la física. Por ejemplo, estos flujos de trabajo de ML ahora son estándar en el modelado hidrográfico. En sismología, los objetos observables, como las primeras ondas P y S que llegan de terremotos de gran magnitud, pueden vincularse a funciones de tiempo de origen del terremoto para facilitar la identificación de eventos, el análisis y la predicción directa de peligros como la intensidad de agitación y las amplitudes de tsunamis.
3. Por último, hay oportunidades para utilizar y aprovechar las fortalezas complementarias de las aplicaciones de ML y HPC. Los prometedores resultados de los métodos de ML para extraer información de grandes conjuntos de datos pueden complementarse con modelos basados en la física para abordar las inquietudes sobre la reproducibilidad y las incoherencias físicas para aplicaciones de peligro y de aviso temprano. Por ejemplo, ML se puede utilizar para acelerar el cálculo y extraer parámetros de control de sistemas complejos. Otro ejemplo es que el ML podría combinarse con los resultados de simulaciones de alta resolución para reducir los cálculos futuros necesarios para el análisis de sensibilidad y la cuantificación de incertidumbre, y para explorar los diseños experimentales óptimos.

Dado que la fase de planificación inicial de RCN de MCS se centró principalmente en el modelado basado en la física, será importante realizar esfuerzos similares para aplicaciones de ciencia computacional basadas en datos como ML en la siguiente fase de SZ4D. Se necesitan talleres y otras actividades de construcción comunitaria para identificar las necesidades de la comunidad, las oportunidades de desarrollo de software de código abierto y las actividades de formación y educación.

### PLAN DE IMPLEMENTACIÓN DE MCS

Para lograr plenamente los objetivos de diseño MCS descritos anteriormente y apoyar el esfuerzo general de SZ4D, imaginamos un centro de MCS que apoyará tanto el modelado centralizado como distribuido impulsado por PI y la ciencia. El centro apoyará esfuerzos centralizados que abarcan ejercicios de desarrollo, verificación y validación de código comunitario, formación a través de tutoriales y hackatones, y el desarrollo de modelos comunitarios y flujos de trabajo para la integración de modelos con flujos de datos de SZ4D y socios internacionales. Además, el centro apoyará el modelado y la ciencia distribuidos, impulsados por PI, proporcionando recursos computacionales (p. ej., apoyo al programador, asignaciones de hardware computacional, apoyo a la planificación para talleres enfocados) como parte de las propuestas competitivas presentadas al programa científico SZ4D.

Los esfuerzos del centro de MCS pueden dividirse ampliamente en ciencia y operaciones como se muestra esquemáticamente en la estructura organizativa en la **Figura MCS-2**. La agenda científica del centro será establecida por el Grupo Integrador de MCS en coordinación con el Comité de Impacto Colectivo de SZ4D; el presidente del Grupo Integrador de MCS también es miembro del Comité de Impacto Colectivo de SZ4D. Estos comités establecerán prioridades para los esfuerzos de desarrollo de códigos y modelos, talleres, formación y otras actividades. La ejecución de estas actividades será responsabilidad de la instalación de MCS. El personal de las instalaciones de MCS está compuesto por:

- El director de MCS, miembro del Comité de Operaciones de SZ4D, que supervisa las operaciones de la instalación y actúa como PI en propuestas para apoyar la instalación.
- El Gerente del Programa de MCS, que maneja las operaciones diarias de la instalación y maneja los aspectos

administrativos de la instalación, como la organización de talleres.

- El Coordinador de Difusión de MCS, que supervisa las actividades de desarrollo de capacidades, en coordinación con el grupo de BECG de SZ4D cuando corresponda. Es posible que este puesto se combine con el Gerente del Programa durante las etapas iniciales de MCS hasta que las responsabilidades crezcan más allá de lo que una sola persona podría manejar.
- Programadores, que apoyan el desarrollo de código centralizado y basado en PI y el desarrollo de modelos comunitarios y los esfuerzos de integración/asimilación de datos.

MCS, en coordinación con el Comité de Impacto Colectivo de SZ4D y los grupos de trabajo, ayudará a crear y apoyar los grupos de enfoque regionales y específicos del proceso descritos en la sección anterior **Objetivos de Diseño de MCS Impulsados por la Comunidad**. Estos grupos iniciarán y mantendrán colaboraciones entre observacionistas, experimentalistas y modeladores para abordar las preguntas científicas de SZ4D e integrar las restricciones de los datos geofísicos, geológicos y experimentales.

La instalación de MCS también respaldará el desarrollo de código comunitario y los ejercicios de verificación y validación. En muchos casos, estos esfuerzos se perseguirán en asociación con organizaciones existentes y/o propuestas como CIG, CSDMS, VICTOR y centros de terremotos y peligros geológicos que surjan del programa de Centros de Innovación y Participación Comunitaria en Peligros Geológicos de Tierra Sólida de la NSF.

Como se evidencia en los capítulos del grupo de trabajo, el estado actual de los esfuerzos de modelado comunitario, los códigos comunitarios de código abierto y, por lo tanto, las necesidades de modelado de cada comunidad son muy variables en todas las disciplinas. Algunos grupos han priorizado la actualización de paquetes de software ampliamente utilizados,



**Figura MCS-2.** Estructura organizativa de MCS. Los cuadros amarillos ilustran los dos componentes principales del MCS: operaciones (instalación MCS) y ciencia (grupo integrador MCS). El grupo integrador de MCS, en coordinación con el Comité de Impacto Colectivo de SZ4D, establecerá prioridades para los esfuerzos de desarrollo de códigos y modelos, talleres, capacitación y otras actividades realizadas por la instalación de MCS. Los cuadros naranjas indican las actividades que realizará la instalación de MCS.

pero relativamente simples, para componentes de modelos específicos (p. ej., modelos de deformación de volcanes hacia adelante e inversa, calculadoras de equilibrio de fases) a idiomas modernos e interfaces de usuario. Otros priorizan el desarrollo de códigos comunitarios de código abierto para resolver problemas complejos (p. ej., modelado de ciclo sísmico) o acoplar códigos existentes en flujos de trabajo de modelado multifísico (p. ej., combinar modelos de ruptura de terremotos y movimiento de tierra con modelos de deslizamientos de tierra y flujo de detritos). En todas las comunidades existe una necesidad común de integrar el modelado a futuro (de modelos físicos completos o aproximaciones de orden reducido más eficientes desde el punto de vista computacional) con varios flujos de datos, a través de inversiones o asimilación de datos.

Una clave de esta visión es que MCS proporcione financiación directa y sostenida, impulsada por la ciencia, para actividades de modelado y desarrollo de código comunitario.

Esta visión contrasta con las operaciones de otras instalaciones computacionales existentes, como CIG o CSDMS, que actualmente tienen una financiación mínima asignada al desarrollo de nuevos modelos/códigos. CIG prioriza la selección y la difusión del software existente y proporciona formación en las mejores prácticas de desarrollo de software. Esto convierte a CIG en un socio natural de MCS para ciertos proyectos de desarrollo de código comunitario como el modelado de ciclos sísmicos. Además, CIG mantiene códigos existentes que se pueden utilizar para abordar algunas preguntas científicas de SZ4D (p. ej., Aspecto para la geodinámica a largo plazo y la migración de magma profundo, PyLith para el modelado de deformación de la corteza). Similar a CIG, pero centrado en los procesos superficiales, el CSDMS apoya el modelado computacional al involucrar a la comunidad, fomentar el desarrollo de herramientas y protocolos computacionales y promover la educación; no invierte fondos significativos en el desarrollo de nuevos códigos. En particular, el CSDMS aloja un gran repositorio de modelos reconocibles de fuentes

de código abierto compilados de la comunidad. A continuación, el CSDMS desarrolla y admite marcos flexibles para unir diferentes códigos, lo que permite ensamblar modelos de sistemas complejos a partir de bloques modulares. VICTOR es un esfuerzo menor que CIG o CSDMS, ya que admite modelos para dispersión de cenizas, flujos de lava y otros problemas relacionados con el volcán desde el respiradero hacia arriba. Actualmente no existe una estructura organizativa comunitaria para desarrollar modelos de transporte de magmas de corteza, por lo que el enfoque más profundo en el grupo de trabajo de MDE de SZ4D es, por tanto, complementario a VICTOR y potencialmente proporciona una plantilla para avanzar en el modelado de sistemas magmáticos en general. Por último, prevemos que en los próximos años surgirán sinergias y colaboraciones con los centros de terremotos y peligros geológicos.

En muchos casos, los programadores de las instalaciones de MCS perseguirán el desarrollo de código comunitario impulsado por MCS bajo la supervisión del director de MCS. Sin embargo, es crucial equilibrar este esfuerzo, que necesariamente se basará en la ciencia impulsada por el consenso, con el desarrollo distribuido de modelos y códigos impulsados por PI. Esto es esencial para apoyar una diversidad de ideas y enfoques y para involucrar a todos los miembros interesados de la comunidad. Prevemos que la financiación para la investigación impulsada por PI provendrá del Programa de Ciencias de la NSF de SZ4D, idealmente a través de un mecanismo basado en propuestas para obtener recursos de MCS, como el tiempo del programador de MCS, las asignaciones de hardware computacional y el apoyo a la planificación de talleres centrados. Esto podría hacerse de manera similar a las solicitudes de apoyo sísmico o geodésico de otras instalaciones principales (p. ej., el Earthscope Consortium). El Comité Directivo de MCS tomará las decisiones de asignación de recursos en coordinación con el Director de MCS y el CIC de SZ4D.

Otro componente de la instalación de MCS será un portal/centro de datos. Mientras que los datos reales de las actividades de SZ4D residen en el EarthScope Consortium y otras instalaciones, la comunidad de SZ4D requiere que un portal/centro de datos aloje productos derivados como modelos comunitarios, repositorios de software y flujos de trabajo que faciliten el acceso a los datos y la integración con los modelos. Aprovecharemos la experiencia de los programas de infraestructura computacional existentes y colaboraremos con otros centros comunitarios (como los enumerados anteriormente) y los esfuerzos de archivo de flujos de trabajo para hacer que los datos básicos y las infraestructuras de productos de datos sean interoperables.

Las actividades de desarrollo de capacidades, supervisadas por el Coordinador de Difusión de MCS junto con el grupo de BECG, tendrán como objetivo reclutar, formar y apoyar a un grupo diverso de científicos con habilidades que unen geociencias, ciencia computacional e informática científica. Estas actividades incluirán los programas de formación descritos anteriormente, pero también podrían incluir programas de becas para estudiantes de posgrado y postdoctorandos. Los alumnos residirían con los PI y se beneficiarían de formar parte de una cohorte coordinada a través del centro MCS, por ejemplo, participando en hackatones anuales, talleres, formación en las mejores prácticas de desarrollo de software y actividades de mentoría.

### FASES

Después de establecer los objetivos de diseño y el plan de implementación para MCS, ahora proponemos un enfoque por fases para hacer realidad esta visión. La fase de MCS se sincroniza deliberadamente con fases similares en los otros componentes de SZ4D. La Fase 0, la fase de planificación, culmina con la publicación de este informe. **La Figura MCS-3** resume el plan de fases MCS, que se enmarca en dos esfuerzos paralelos centrados en la integración del flujo de datos y el modelado basado en procesos.

**LA FASE 1** se centra en el diseño y desarrollo de la tecnología (incluido el software de modelado e integración de datos) necesaria para recopilar e interpretar datos de los despliegues de SZ4D. La instalación de MCS (**Figura MCS-3**) puede comenzar inmediatamente con un Director, un Director de Programa (que también servirá temporalmente como Coordinador de Difusión) y un Comité Directivo. Se pueden iniciar grupos de enfoque regionales y de procesos. La participación de la comunidad a través de talleres perfeccionará las prioridades de desarrollo de modelos y códigos más allá de las identificadas en talleres de MCS anteriores y se resumirá en los informes de talleres de MCS y capítulos del grupo de trabajo. La instalación de MCS puede comenzar a contratar programadores para iniciar el desarrollo de código, inicialmente de manera centralizada en los códigos comunitarios, y ampliarse para apoyar los esfuerzos impulsados por PI una vez que comience el Programa de Ciencias de SZ4D de la NSF. MCS también compilará y ensamblará

las restricciones existentes de los laboratorios regionales (especialmente Chile, Cascadia y Alaska) y comenzará a ensamblar modelos estructurales y, cuando sea posible, dinámicos. Estos esfuerzos de modelado se orientarán hacia la exploración de configuraciones óptimas para redes instrumentales. Los planes para el portal/centro de datos de MCS se perfeccionarán y comenzarán a trabajar en el desarrollo de flujos de trabajo para la integración y asimilación de datos. También deben comenzar los esfuerzos de formación, que podrían incluir programas de becas para estudiantes de posgrado y postdoctorandos, si hay fondos disponibles.

**LA FASE 2** abarca el esfuerzo observacional a escala decadal. Los esfuerzos de desarrollo de modelos y códigos continuarán, con algunos códigos listos para el modelado específico de la región y la integración de datos. Los conocimientos de los esfuerzos impulsados por PI se incorporarán a los códigos comunitarios. Los esfuerzos de formación se centrarán en

	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Integración del flujo de datos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilizar las herramientas/métodos existentes para guiar el despliegue del instrumento</li> <li>- Probar/desarrollar infraestructura para vincular modelos a flujos de datos entrantes</li> <li>- Estas herramientas tienen limitaciones y aproximaciones conocidas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Integrar flujos de datos en modelos de estructura comunitaria para su uso en simulaciones y evaluación de peligros</li> <li>- Comparación de códigos existentes y recientemente desarrollados para evaluar diferencias y mejoras</li> <li>- Transición a nuevos códigos para flujos de datos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mejora continua de la integración de flujo de datos de alto volumen con el software</li> <li>- Refinamiento continuo de modelos de estructura comunitaria para su uso en simulaciones y evaluación de peligros</li> <li>- Códigos comunitarios bien probados</li> <li>- Completamente comparados</li> </ul>
Geofísica/Peligros Simulación basada en procesos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Desarrollo de modelos motivados por la observación</li> <li>- Incorporación de nuevos procesos y/o física</li> <li>- Identificar/desarrollar nuevos enfoques numéricos y herramientas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ampliar las aplicaciones problemáticas (p. ej., geometría, 3D frente a 2D, tiempo, física)</li> <li>- Referencia completa de nuevos códigos</li> <li>- Vincular o incrustar en códigos más generales</li> <li>- Iniciar actividades de documentación/formación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Escalados a aplicación completa</li> <li>- Listos para aplicar a múltiples preguntas, regiones, etc.</li> <li>- Respaldados por la comunidad a través de documentación, hackatones, talleres, etc.</li> </ul>

Figura MCS-3. Diagrama de fases para actividades de MCS.

ampliar el acceso de los usuarios para incluir científicos observacionales y de laboratorio a través de tutoriales, hackatones y planes detallados. Es probable que esto requiera contratar a un Coordinador de Difusión de MCS independiente. Los programas de becas deben comenzar, si aún no lo han hecho. La instalación de MCS implementará el portal/centro de datos, que incluirá el flujo de trabajo y, idealmente, portales basados en la nube para ejecutar modelos directos e inversos, tanto para problemas idealizados como específicos de la región, e integrar datos de las redes instrumentales de SZ4D. Las aportaciones de la comunidad basadas en modelos integrados en datos se utilizarán para refinar hipótesis, identificar brechas de conocimiento y mejorar estrategias observacionales.

**LA FASE 3** sintetiza los datos observacionales con modelos recién desarrollados y restricciones experimentales para responder a las preguntas

científicas de SZ4D. Los esfuerzos de desarrollo de código y modelo comunitario alcanzarán la madurez con respecto a las capacidades de integración de datos y la accesibilidad a través del portal/centro de datos para su uso por parte de la comunidad. Los esfuerzos impulsados por PI seguirán explorando hipótesis e interpretaciones alternativas de los datos de SZ4D.

Estamos en la cúspide de lograr un nuevo nivel de conocimiento sobre la ciencia y los peligros de la zona de subducción, formando a la nueva generación emergente de científicos de subducción computacional y elevando los enfoques de geociencia computacional a una verdadera asociación con enfoques observacionales y de laboratorio en general. Lograr este cambio de paradigma requiere una inversión audaz y podría ser el comienzo de una nueva área en la geociencia de la tierra sólida.

## REFERENCIAS

- Gonnermann, H., Anderson, K., Sisson, T., Bergantz, G., Pritchard, M., Jackson, M., Ruprecht, P., et al. (2021). *Modeling Volcano-Magmatic Systems: Crustal Magma Transport, Storage and Eruption (Draft)*, Modeling Collaboratory for Subduction, Austin TX. <https://bit.ly/3nYhl9W>
- Dunham, E. M., Thomas, A., Becker, T. W., Cattania, C., Hawthorne, J., Hubbard, J., Lotto, G. C., et al. (2020). *Modeling Collaboratory for Subduction RCN Megathrust Modeling Workshop Report*. EarthArXiv. <https://doi.org/10.31223/X5730M>
- McGuire, J.J., T. Plank, et al. 2017. *The SZ4D Initiative: Understanding the Processes that Underlie Subduction Zone Hazards in 4D*. Vision Document Submitted to the National Science Foundation. The IRIS Consortium, 63 pp.
- Naif, S., Key, K., Constable, S., & Evans, R. L. (2015). Water-rich bending faults at the Middle America Trench, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16, 2582–2597. <https://doi.org/10.1002/2015GC005927>
- Wada, I., Karlstrom, L., Arcay, D., Caricchi, L., Fulton, P., Gerya, T., Iacovino, K., et al. (2019). *Modeling Collaboratory for Subduction RCN Fluid Migration Workshop Report*. Modeling Collaboratory for Subduction, Austin, TX. <https://bit.ly/3p5ia6R>
- Wada, I., & Karlstrom, L. (2020). Modeling fluid migration in subduction zones. *Eos*, 101 <https://doi.org/10.1029/2020EO145551>

# GEOGRAFÍA

## IDENTIFICACIÓN DE REGIONES DE SZ4D DE ESPECIAL INTERÉS

El objetivo principal de la iniciativa de SZ4D es mejorar la comprensión de cómo interactúan los diferentes componentes de los sistemas de zonas de subducción para producir y ampliar los peligros geológicos. Una parte integral de este esfuerzo es obtener nuevos datos observacionales sobre terremotos, tsunamis, volcanes y remoción en masa. Se ha hecho evidente que la instrumentación densa, consistente y a largo plazo junto con la gestión de datos de alto nivel es clave para hacer grandes avances en esta área.

Nuestras necesidades geográficas requieren un enfoque híbrido para la recopilación de datos. Los grupos de trabajo de FEC y L&S identificaron requisitos técnicos que incluyen redes instrumentales densas y enfocadas, mientras que el grupo de trabajo de MDE identificó la necesidad de un enfoque más distribuido para la recopilación de datos en los volcanes. Como se comenta en este capítulo, tanto por motivos científicos como prácticos, para maximizar el beneficio científico será necesario centrar la mayoría de los recursos en una o dos regiones. Este enfoque

geográfico se aumentará mediante el desarrollo de una coalición de países que llevarán a cabo estudios colaborativos de zonas de subducción y aprovecharán los esfuerzos similares existentes en zonas de subducción de todo el mundo. Estos esfuerzos permitirán comparaciones entre zonas de subducción y la generalización de los resultados del estudio centrado.

Implementamos un proceso, descrito a continuación, para determinar las mejores ubicaciones para asentar un observatorio en la zona de subducción que fuera capaz de abordar las preguntas de investigación de todos los grupos de trabajo e integradores. A partir de esta actividad, descubrimos que era necesario un enfoque comparativo de la ciencia de la zona de subducción, en el que diferentes segmentos de la zona de subducción podían ser instrumentados de forma diversa y las actividades realizadas, para cumplir con los objetivos SZ4D. La RCN del marco de SZ4D identificó tres ubicaciones principales que incluían un centro internacional (Chile) y dos centros nacionales (Alaska y Cascadia).

Además, la RCN identificó la necesidad de establecer conexiones entre esfuerzos en otras zonas de subducción complementarias (p. ej., Japón, Centroamérica, norte de Sudamérica) para formar una red de redes que abarca la ciencia de la zona de subducción.

### RESUMEN DE LAS NECESIDADES DE ENFOQUE REGIONAL

El esfuerzo de SZ4D ha identificado la necesidad de una red instrumental central de instrumentación geodésica y sísmica anfibia (MegaArray), una red instrumental volcánica (VolcArray) y una red instrumental de detección de cambios en la superficie y el medio ambiente (SurfArray), además de la adquisición de imágenes complementaria y el trabajo geológico. Estos esfuerzos requieren una presencia física en regiones particulares del mundo.

Los esfuerzos de modelado, analógicos geológicos y experimentales son necesarios para colocar las observaciones de las redes instrumentales primarias en contexto, donde las condiciones límite de una región específica pueden determinarse a partir de geometrías e historia conocidas. Todos estos componentes pueden vincularse mediante observaciones concretas recopiladas en un contexto geográfico.

Como se describe en la introducción a este documento, los grupos de trabajo de SZ4D utilizaron matrices de trazabilidad para identificar las necesidades científicas comunes para todas las preguntas científicas, incluidas las características de alta prioridad de las áreas de estudio. También se recopiló un inventario de segmentos de zonas de subducción para que las regiones individuales pudieran evaluarse sistemáticamente para determinar su relevancia para las prioridades científicas. Cada grupo sopesó individualmente el valor relativo de los segmentos y luego cumplió con las necesidades de equilibrio. Esos debates llevaron a la lógica presentada en este capítulo.

### COOPERACIÓN CON SOCIOS INTERNACIONALES

Para todas las regiones que se están considerando en gran medida para los componentes de las actividades de campo de SZ4D, es esencial que, desde el principio, los colegas de EE. UU. y en el país establezcan una comunicación clara y abierta. Esto es necesario para identificar las prioridades de todas las partes interesadas, las diferencias y sensibilidades culturales, el conocimiento científico local establecido y la infraestructura y los recursos utilizables existentes. Del mismo modo, debemos identificar aspectos mutuamente beneficiosos del proyecto, incluidos los productos de investigación, la aplicación para mejorar la infraestructura y mitigar el riesgo y el desarrollo de capacidades. La cooperación se extenderá necesariamente más allá de los países en los que se desarrolle infraestructura como parte de SZ4D para incluir otras naciones afectadas por la subducción que puedan beneficiarse y proporcionar perspectivas a nuestras actividades planificadas.

### EL VALOR DE LOS SITIOS COMPLEMENTARIOS

El aislamiento de variables es un problema difícil en las ciencias de observación. La estrategia más eficaz es formar un conjunto de sitios de comparación que difieran solo en algunas formas científicamente interesantes. Por ejemplo, las comparaciones de zonas de subducción rápida y lenta donde la composición de la placa superpuesta es comparable serían útiles para determinar el papel de la tasa de convergencia de la placa en el control del estilo de ruptura del terremoto. Este enfoque de subductología<sup>1</sup> ha proporcionado información sobre revisiones anteriores de datos existentes, pero no se ha utilizado ampliamente como estrategia de despliegue.

<sup>1</sup> Uyeda acuñó "Subductología comparativa" (1982) como un proceso de agrupamiento de zonas de subducción de acuerdo con sus propiedades geométricas, geodinámicas y cronológicas para estudiar la correlación de estos factores con la dinámica de la zona de subducción.

La subductología como parte de SZ4D puede aprovechar los principales esfuerzos internacionales para algunos observables. La serie de seminarios web internacionales de SZ4D de 2020-2021 destacó algunos de estos esfuerzos: Japón, Taiwán y Cascadia ya cuentan con cables en el fondo marino que proporcionan conjuntos de datos valiosos que deben complementarse cuidadosamente con cualquier instrumentación nueva.

## REQUISITOS GEOGRÁFICOS CLAVE

### Requisitos científicos

Cada grupo de trabajo desarrolló requisitos científicos clave. En primer lugar, el diseño experimental emparejado definido por el grupo de L&S requiere sistemas de zonas de subducción comparativos en los que factores particulares podrían considerarse fijos, mientras que un número limitado de otros factores varió. Las **cuatro características esenciales del sitio** necesarias para llevar a cabo los experimentos teóricos y las pruebas de hipótesis de L&S incluyeron:

1. Al menos una parte del sitio debe incluir la exposición subaerial del antearco (sin hielo);
2. Deben existir restricciones de observación o *ser aceptables* en los sitios adecuados; y
3. Al menos una parte de los sitios debe incluir rocas con minerales susceptibles de geocronología y termocronología como cuarzo, apatito y circón. Una vez identificados los segmentos de zona de subducción que cumplieran estas condiciones, se trazó un emparejamiento de segmentos en los que la variación independiente en factores de interés específicos (p. ej., tasa de convergencia de placas) se asignó a los experimentos teóricos de L&S para determinar el emparejamiento óptimo de los segmentos de zona de subducción.

Los **conjuntos de hipótesis A y C** de MDE

requerirán una caracterización multiparamétrica de una década de duración del comportamiento entre erupciones y erupciones en un gran número (~30–50) de arcos volcánicos que exhiben desequilibrios magmáticos (desgasificación activa, deformación y/o desequilibrios sísmicos), tienen antecedentes de erupciones frecuentes pero no continuas y alguna caracterización previa, y representan un rango diverso de actividad volcánica. El **conjunto de hipótesis B de MDE** requerirá la obtención de imágenes geofísicas de sistemas magmáticos transcorticales y la caracterización detallada del historial de erupciones en un pequeño número de volcanes representativos (dos por arco) en tres arcos (los dos sitios complementarios SZ4D y un segmento de arco adicional) que representan una convergencia rápida, intermedia y lenta. Para los seis volcanes objetivo, los requisitos críticos son el acceso a un área de tierra significativa para ciertas observaciones clave, como despliegues sísmicos y geodésicos de gran apertura e InSAR y exposiciones o registros excelentes y accesibles de depósitos eruptivos pasados para el estudio de volumen, intensidad eruptiva, composición, termobarometría, geocronometría y geovelocimetría. MDE también tiene como objetivo estudiar sitios exhumados que representan análogos antiguos para sistemas activos estudiados simultáneamente. Son ideales los lugares donde se pueden caracterizar los tiempos de residencia de la corteza, las composiciones magmáticas y las profundidades de almacenamiento durante los períodos de flujo “alto” y “bajo”. Además, las localidades que conservan registros plutónicos y volcánicos contemporáneos podrían ser particularmente útiles para conectar observaciones plutónicas con productos volcánicos.

Los sitios ideales para el componente de FEC poseen las siguientes características:

1. Fallas conocidas grandes y activas en placas ascendentes y descendentes;
2. Altas tasas de convergencia;
3. Eventos conocidos de deslizamiento lento;
4. Altas tasas de sismicidad;

5. Gradientes fuertes conocidos en el acoplamiento a lo largo del rumbo;
6. Evento tsunamigénico conocido;
7. Historial preservado de deslizamientos por fallas, terremotos y tsunamis; y
8. Evidencia de un gran terremoto que rompió toda la zona sísmogénica.

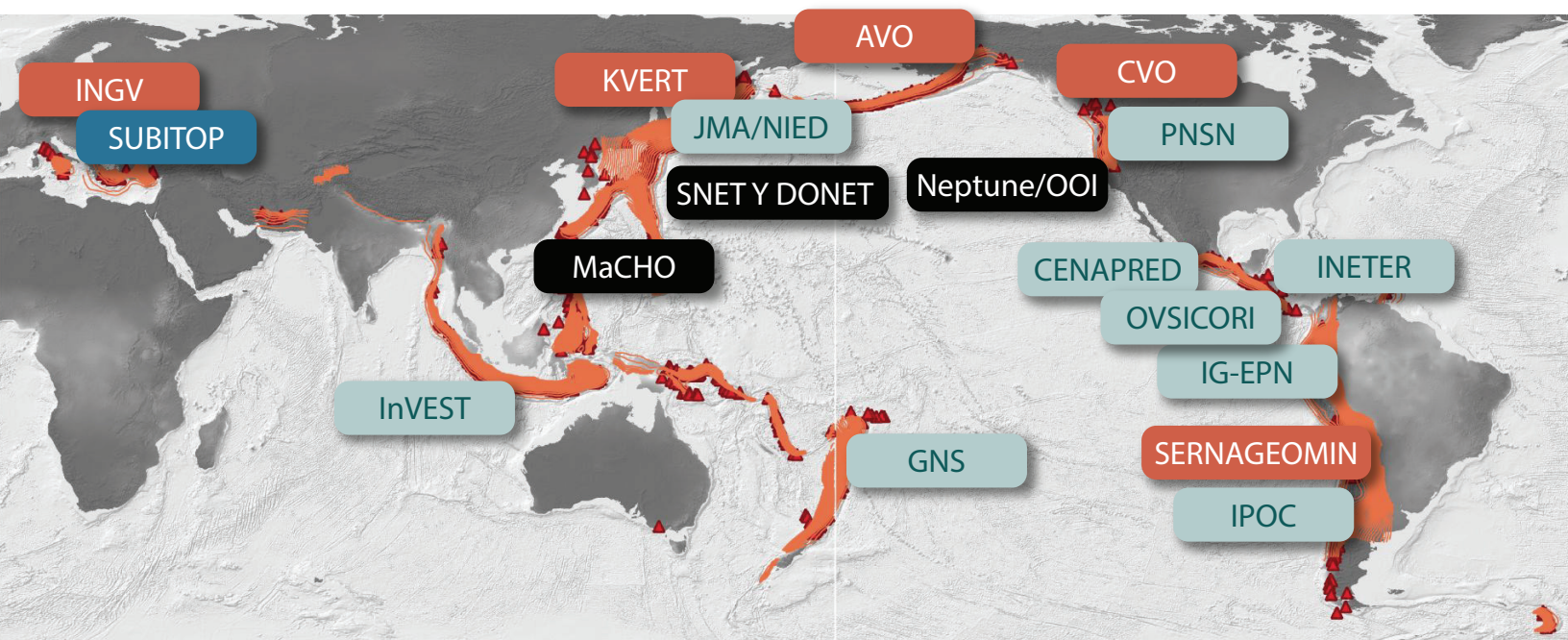
Debido a que el objetivo general de FEC es comprender cuándo y dónde a lo largo de la zona sísmogénica ocurren terremotos grandes y dañinos en la zona de subducción, un requisito fundamental es que se sepa que los sitios de estudio son capaces de producir terremotos tan grandes. El acoplamiento sísmico también es un factor significativo para las cuatro preguntas científicas de FEC; el grado en que las placas están bloqueadas es un tema predominante que afecta a todos los aspectos del ciclo sísmico, así como al paisaje relacionado y los procesos volcánicos. Las altas tasas de sísmica y las tasas de convergencia son favorables para observar el comportamiento de la zona de subducción

en una escala de tiempo decadal (**Pregunta científica 1 de FEC**). Existe la preferencia de llegar tarde en el ciclo sísmico, si es posible, para aumentar la probabilidad de observar el comportamiento precursor antes de un terremoto grande (**Pregunta científica 3 de FEC**). Para capturar las escalas espaciales relevantes de grandes terremotos de zonas de subducción, las áreas de estudio deben abarcar al menos ~500 km a lo largo del rumbo.

### Requisitos logísticos

Una piedra angular del SZ4D es permitir la interacción multidisciplinaria a gran escala entre científicos que tienen un profundo conocimiento del contexto del campo. Esta ambición requiere tomar un alto grado de precauciones de seguridad para un gran número de científicos que pueden visitar la región directamente como parte de SZ4D o en proyectos complementarios. Por lo tanto, cualquier región que tenga problemas de seguridad graves, continuos y bien documentados no debe ser el foco de los esfuerzos de campo de SZ4D. La lista de

**Figura G-1.** Ejemplos de regiones y redes con instrumentación existente en zonas de subducción. Los colores indican el tipo de red. Naranja: Volcán. Verde: Terremoto y volcán combinados. Azul: Relieves. Negro: Observatorio submarino.



Asesoramiento de Viajes del Departamento de Estado de los EE. UU. proporciona una recopilación útil de información de seguridad. Cualquier región que esté en el nivel 3 o 4 de esta lista por motivos no relacionados con la COVID-19 en el momento de la presentación de una propuesta no puede ser un sitio de campo (entendemos que las preocupaciones de viaje relacionadas con la COVID-19 se reducirán cuando se implemente SZ4D por primera vez). Esperamos que los científicos de esas regiones puedan seguir contribuyendo a SZ4D a través del trabajo en sitios de enfoque seleccionados y mediante comparaciones con otras zonas de subducción. El establecimiento de un límite práctico basado en los lineamientos federales es simplemente una cuestión de establecer un estándar común y objetivo para el trabajo que implique a un número sustancial de participantes que viajan a la región utilizando financiación federal.

Dado que es probable que SZ4D se financie principalmente a nivel federal, los datos recopilados como parte del proyecto deben ser de acceso abierto y coherentes con las políticas de NSF y otras agencias. Por lo tanto, cualquier colaboración internacional tendrá que proceder solo si se permite dicha divulgación de datos abiertos.

## LA CARTERA GLOBAL

Varias regiones del mundo ya tienen un importante enfoque científico e instrumentación en los procesos de la zona de subducción (**Figura G-1**). Los esfuerzos de observación de SZ4D deben complementar las inversiones principales anteriores y continuas. Cabe destacar los principales esfuerzos observatorios de cables marinos en Japón, Taiwán y Cascadia. Estas inversiones significativas deben guiar las elecciones tecnológicas y científicas de los sitios complementarios en otros lugares. Del mismo modo, la importante instrumentación volcánica en una mezcla de centros observatorios académicos y gubernamentales informa las elecciones estratégicas de las regiones de

estudio que pueden seleccionarse para cubrir las brechas, al tiempo que aprovecha el trabajo previo que establece el contexto para futuras mediciones. Históricamente, los estudios de relieves no han tenido importantes iniciativas de infraestructura con algunas excepciones, como el proyecto de la UE, Horizon 2020 SUBITOP, y los esfuerzos de larga duración en Taiwán. El paisaje marino es incluso un enfoque más reciente del esfuerzo, y el nuevo trabajo de USGS y otros en Cascadia y Alaska está empezando a mostrar el valor de los esfuerzos regionales.

Es fundamental para lograr los objetivos científicos de SZ4D construir una cartera global de instrumentos y actividades que la comunidad científica internacional pueda aprovechar. Esta estrategia requiere primero desarrollar una red global coordinada de observatorios de zonas de subducción para compartir tecnologías, datos e información. Existen interacciones informales entre científicos y observatorios, pero la cartera global se beneficiaría de estructuras más regulares y formales para la tecnología, los datos y el intercambio humano.

La mejora de la cartera global también requiere el uso estratégico de los recursos de SZ4D para seleccionar cuidadosamente regiones geográficas que complementen los esfuerzos existentes. Los esfuerzos complementarios deberían evitar la redundancia y, por lo tanto, los recursos de SZ4D no se gastarían bien en áreas que ya están instrumentadas a la vanguardia de la tecnología actual, como Japón. Los esfuerzos complementarios también deben basarse en conocimientos y datos regionales extensivos para maximizar las ganancias potenciales durante el período de tiempo relativamente corto (pocas décadas) de nuestro trabajo. Las áreas que han tenido poco o ningún estudio previo probablemente no deberían ser el enfoque principal de nuestros esfuerzos. Por ejemplo, el arco de Scotia es geológicamente interesante, pero no tiene suficientes datos de referencia para un esfuerzo concertado en la próxima década.

El requisito de un segmento largo de zona de subducción que sea logísticamente viable elimina de la consideración otras áreas geológicamente significativas. Las preocupaciones de seguridad en partes de México, Indonesia y Centroamérica dificultan la definición de un segmento continuo que cumpla con los requisitos científicos y prácticos del proyecto.

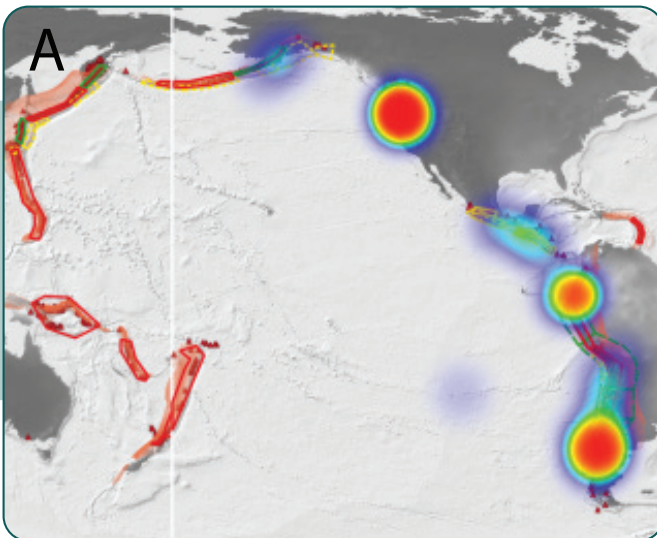
### PROCESO PARA IDENTIFICAR REGIONES DE ESPECIAL INTERÉS

Teniendo en cuenta estos requisitos y restricciones operativas, la RCN de SZ4D implementó un proceso de múltiples pasos para identificar regiones de especial interés. A través de debates detallados, el grupo de trabajo y los miembros del grupo intersectorial identificaron conjuntamente los sitios adecuados para cubrir las brechas en nuestra comprensión fundamental

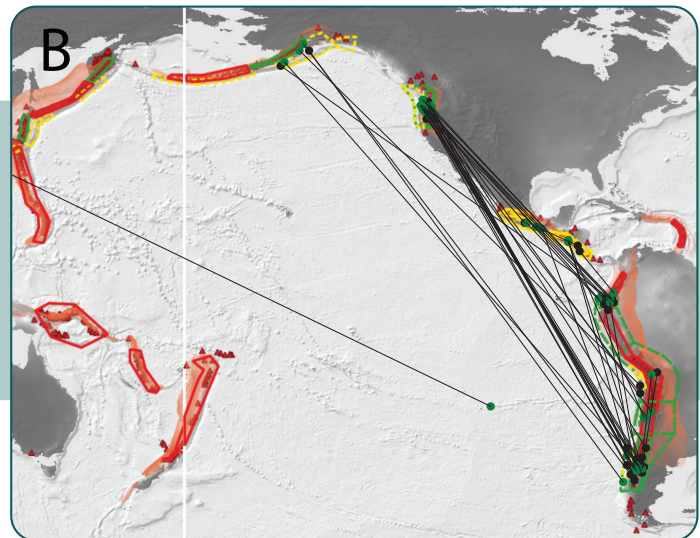
de los peligros geológicos particulares, así como los sitios donde el conocimiento adquirido se puede utilizar para informar y reducir el riesgo nacional de peligros geológicos.

Como primer paso, los debates entre toda la RCN de SZ4D sopesaron los pros y los contras de varias áreas geográficas, incluidos los sitios nacionales e internacionales. Después de varios días de debate, los participantes recibieron un mapa global de posibles sitios de zonas de subducción. En esos mapas, podrían seleccionar dos ubicaciones (según la prioridad) que podrían satisfacer las necesidades conjuntas de los diferentes grupos de trabajo e intersectoriales. Este ejercicio no fue una votación, sino una evaluación informal del nivel de convergencia en los sitios geográficos por parte de los miembros del grupo de trabajo después de días de conversaciones. La densidad de las áreas seleccionadas, así como la correspondencia entre sitios seleccionados por miembros individuales, se muestra en el **Figura G-2**.

#### Clics del sitio



#### Correspondencias



**Figura G-2.** (A) Mapa de calor de los centros seleccionados de RCN de SZ4D tras el análisis de las características del centro, las necesidades disciplinares y la idoneidad general del centro. Las áreas que se muestran más prominentemente en rojo muestran una mayor densidad de selecciones. (B) Correspondencias entre sitios seleccionados por personas. Cada segmento de línea vincula los dos sitios seleccionados por cada individuo.

Los resultados de este ejercicio identificaron dos áreas principales de convergencia: Chile (24 selecciones en total, con 16 de estas selecciones calificadas como la primera prioridad, mientras que ocho fueron seleccionadas como la segunda prioridad) y Cascadia (22 en total, con seis de estas selecciones calificadas como la primera prioridad, mientras que 16 fueron calificadas como la segunda prioridad). La priorización emparejada más frecuente fue entre Chile y Cascadia (12 participantes identificaron esta combinación, nueve de ellos denominaron a Chile como primera prioridad y tres denominaron a Cascadia como primera prioridad). La conclusión principal de este ejercicio fue que la RCN de SZ4D requería tanto un sitio internacional como nacional al diseñar los esfuerzos de SZ4D, e idealmente estos centros proporcionarían comparaciones complementarias. Cuando se plantea la pregunta, "¿Debería el SZ4D dirigirse a sitios nacionales e internacionales complementarios?", 41 de los 42 miembros de la RCN de SZ4D votaron "sí". Cuando se le preguntó "Si hay un sitio internacional, ¿debería Chile ser el sitio de atención principal?", 37 de los 42 miembros votaron "sí". Por lo tanto, pareció haber un fuerte consenso para encontrar sitios internacionales y nacionales complementarios, y de los sitios internacionales, Chile fue el fuerte favorito. Esta información permitió a la RCN de SZ4D identificar "Regiones de interés especial", que se documentan a continuación.

## REGIONES DE ESPECIAL INTERÉS

### Chile

La zona de subducción chilena posee casi todos los atributos científicos de alta prioridad identificados por los grupos de trabajo de SZ4D. Factores como el descenso de losa, la tasa de convergencia y el clima varían sistemáticamente a lo largo de la zona de subducción, lo que permite que se lleven a cabo muchos experimentos naturales a lo largo de un único sistema de zona de subducción. La convergencia rápida conduce a una abundante actividad sísmica, volcánica y de

deslizamientos de tierra. La zona de subducción chilena experimentó el terremoto más grande registrado instrumentalmente en 1960 y muchos terremotos >M8 desde entonces, y tiene 96 volcanes con erupciones en el Holoceno, y se han registrado 33 erupciones discretas en el siglo XXI. Esta exposición significativa es evaluada y caracterizada constantemente por organizaciones gubernamentales nacionales, por lo que los descubrimientos científicos realizados por SZ4D tienen un camino claro hacia la implementación en ciencias aplicadas a través de asociaciones con estas organizaciones. Las oportunidades presentadas por la zona de subducción chilena han producido esfuerzos que han estado en curso en la región durante décadas con instrumentación terrestre y marino temporalmente. Es importante destacar que existe una sólida comunidad de científicos de peligros geológicos que trabajan en Chile tanto en entornos de observatorios nacionales y académicos. Esta comunidad ha desarrollado redes internas y también ha construido colaboraciones internacionales con socios alemanes, franceses, estadounidenses y otros socios para desarrollar instrumentos que estuvieran bien situados para capturar algunos de los terremotos más significativos a principios del siglo XXI. Los 4500 km de zona de subducción continental en un solo país la hacen única en todo el mundo. Las colaboraciones internacionales también han producido un centro de batimetría de resolución moderada para gran parte del margen, lo que permite la recopilación de batimetría de alta resolución en áreas específicas. Durante las últimas dos décadas se han realizado importantes imágenes sísmicas pasivas y activas terrestres y marinas, que pueden complementarse estratégicamente con los esfuerzos de SZ4D. Las redes chilenas y argentinas abarcan todo el sistema de zonas de subducción y han permitido que se realice una cantidad sustancial de recopilación de datos nacionales e internacionales en tierra durante los últimos 40 años. Puede haber oportunidades en Chile tanto terrestres como marinas para complementar los esfuerzos existentes.

### Cascadia

Los márgenes de Washington y Oregon tienen el mayor riesgo asociado de cualquier zona de subducción nacional y, por lo tanto, merecen una atención especial. Las implicaciones sociales asociadas con una erupción volcánica importante o la agitación del suelo y el tsunami asociados con el eventual terremoto de magnitud 9 pesan mucho en la región. Además, la infraestructura financiada (OSU-UW CoPes Hub) permite que las actividades de SZ4D afecten a los esfuerzos de resiliencia, que es un objetivo principal de los esfuerzos de BECG. El hecho de que la ciencia pueda traducirse en esfuerzos sobre el terreno, de riesgo nacional y resiliencia hace que este sitio sea particularmente atractivo. Además, la accesibilidad proporcionada por este sitio nacional lo convierte en un área ideal donde se pueden implementar muchas de las aspiraciones de los esfuerzos de BECG de SZ4D.

Científicamente, la zona de subducción de Cascadia posee algunos atributos favorables para abordar preguntas científicas de L&S y MDE. La variabilidad significativa a lo largo del impacto en el volcanismo, incluidos los volúmenes erupcionados, difiere en un factor de dos entre las partes sur y norte del arco. Además, Cascadia presenta cambios importantes en la partición del volcanismo entre estructuras volcánicas centrales intermedias y dominadas por silícicos y campos de centros monogenéticos más dispersos y máficos. El alto acoplamiento y los eventos de deslizamiento lento conocidos son favorables para algunos objetivos de FEC, pero la tasa de convergencia lenta y las bajas tasas de sismicidad hacen de Cascadia una región subóptima para abordar muchas de las preguntas científicas de FEC, especialmente aquellas relacionadas con las relaciones entre terremotos y otros comportamientos de deslizamiento y comportamiento precursor. En consecuencia, esta región se presta mejor a un subconjunto de enfoques, como paleosismología, imágenes geofísicas, estudio de tiempo-profundidad de sistemas de fallas en tierra y volcanes relativamente inactivos pero diversos, y deslizamientos lentos y temblores.

Hay una gran cantidad de datos existentes que se pueden aprovechar para estudios de Cascadia y comparaciones con otras zonas de subducción, incluidos datos sísmicos de la Iniciativa Cascadia, adquisición de imágenes sísmicas activas y pasivas terrestres/marinas (incluida la reciente adquisición de un conjunto de datos sinóptico de refracción/reflexión sísmica de penetración profunda en 2D a lo largo del margen), perfil magnetotelúrico, mapeo batimétrico, extensa cartografía topográfica subareal de alta resolución, la geoquímica de lava, y estudios geológicos en tierra/mar adentro. También hay muchas oportunidades de colaboración con otras organizaciones estadounidenses, incluida el USGS, que enfatiza Cascadia dentro de su iniciativa de subducción. Por lo tanto, la estrategia ideal del estudio es combinar un estudio de Cascadia con un análogo de subducción más rápido que pueda proporcionar la información sobre los plazos humanos que, en última instancia, serán importantes para interpretar y predecir el comportamiento futuro de la zona de subducción más prominente de los Estados Unidos.

### Aleutianas/Alaska

La zona de subducción de las Aleutianas/Alaska (AA) tiene erupciones frecuentes y diversas y terremotos frecuentes, y por lo tanto algunas secciones de esta zona de subducción de ~2000 km de longitud se consideraron áreas de estudio favorables por el FEC y MDE. Para el FEC, el historial de grandes terremotos, variaciones en el acoplamiento, historia de rupturas y sismicidad en la península de Alaska hacen de esta región un objetivo atractivo posible para el estudio; se pensó que un segmento estaba relativamente tardío en el ciclo sísmico. La ocurrencia de una serie de grandes terremotos interplaca aquí en 2020-2021 ha liberado parte de la energía almacenada, lo que podría complicar uno de los atractivos de esta ubicación. La región tiene una rica diversidad en estructura de arco y tectónica, sedimentos y afluencia volátil que alimentan la generación primaria de magma y procesos de diferenciación de magma de corteza, con el consiguiente resultado de la producción de una

gama completa en estilos de erupción desde sus diversos centros volcánicos. Sin embargo, esta región es problemática para el grupo de L&S debido a la reciente historia glacial, que hace que muchos aspectos de la geocronología requerida sean problemáticos, y a la falta de un amplio antearco subareal con el que estudiar peligros geológicos importantes como los deslizamientos de tierra y las inundaciones. El enfoque de su trabajo requiere una superficie de tierra expuesta sustancial. Para todos los grupos, la ubicación remota y el clima desafiante son obstáculos.

Una ventaja de la zona de subducción de AA para MDE y la FEC es que es un sistema relativamente bien estudiado con abundantes datos geoquímicos existentes. Se han adquirido imágenes geofísicas y datos batimétricos en algunas áreas, especialmente fuera de la península de Alaska, pero la cobertura no es uniforme debido al tamaño y la lejanía de esta zona de subducción. Al igual que con Cascadia, hay oportunidades significativas para colaborar con otras entidades estadounidenses, como el Observatorio de Volcanes de Alaska, el Centro de Terremotos de Alaska, el USGS y el Centro Nacional de Alerta de Tsunami de la NOAA.

## PRIORIZACIÓN DE INSTRUMENTOS Y ACTIVIDADES DENTRO DE LAS REGIONES DE INTERÉS

La identificación de “Regiones de interés” cumplió con el requisito de centros internacionales y nacionales complementarios. Sin embargo, la pregunta de cómo asignar recursos de forma más eficaz entre las “Regiones de interés” para abordar las preguntas científicas de SZ4D requirió debates adicionales posteriores. Durante estos debates, se hizo evidente que los tipos de recursos necesarios variarían entre las diferentes áreas, porque algunas áreas requerirían la construcción de amplias redes de instrumentación, mientras que otras contienen un centro de observación que ya está en marcha. En este sentido, algunos sitios

pueden requerir una instrumentación extensa, mientras que otros requerirían actividades científicas (como estudios de campo, modelado, difusión) que aprovecharían y aumentarían la instrumentación existente para responder a las preguntas científicas de SZ4D. Por este motivo, los miembros de la RCN de SZ4D consideraron las “Regiones de especial interés”, en términos de cómo la instrumentación y las actividades podrían dividirse entre los diferentes sitios para maximizar su utilidad en la respuesta a las preguntas científicas de SZ4D.

Después de una serie de debates centrados en las capacidades y actividades de observación necesarias (y existentes), se utilizó un cuestionario para recopilar las opiniones de los participantes sobre cómo asignar prioridad a los instrumentos y actividades entre estos tres posibles sitios y, por lo tanto, evaluar la convergencia entre todos los miembros del grupo de trabajo disciplinario. Cada participante recibió un total de 10 puntos (enteros) por instrumentos y 10 puntos (enteros) por actividades. Estos puntos podrían asignarse a cada una de las tres “Regiones de interés especial” para cada categoría (instrumentos frente a actividades). Cuarenta y dos participantes realizaron esta asignación, cuyos resultados se resumen en la **Tabla G-1**.

Aunque hubo cierta variabilidad en la forma en que los instrumentos y las actividades se asignarían entre los diferentes sitios que dependían del grupo de trabajo o intersectorial específico, hubo una coherencia notable en la asignación entre los encuestados, a pesar de los objetivos y necesidades dispares de los diferentes grupos. Este cuestionario informal indicó un acuerdo amplio y coherente de que la instrumentación debe desplegarse de forma dominante a lo largo de la zona de subducción chilena (6.9), y de que se debe asignar una menor inversión de instrumentación a Cascadia (2.2) y Alaska (0.9). Por otro lado, los participantes asignaron actividades de forma más uniforme entre los sitios (Chile: 5.1, Cascadia: 3.6, Alaska: 1.3). Por lo tanto, la RCN de SZ4D pareció favorecer la inversión en instrumentos pesados en el centro internacional, mientras que las

Sitio	Puntuación disciplinaria ponderada para el número de participantes en cada grupo		FEC		MDE		L&S	
	Instrumentación	Actividades	Instrumentación	Actividades	Instrumentación	Actividades	Instrumentación	Actividades
Chile	6,9	5,1	6,4 ± 1,7	4,9 ± 1,1	7,1 ± 1,8	5,2 ± 1,3	7,2 ± 1,4	5,1 ± 0,8
Cascadia	2,2	3,6	2,3 ± 1,2	3,3 ± 1,2	2,0 ± 1,1	3,3 ± 1,3	2,3 ± 1,3	4,2 ± 1,0
Alaska/Aleutianas	0,9	1,3	1,3 ± 1,3	1,8 ± 1,2	0,9 ± 0,8	1,5 ± 1,3	0,5 ± 0,7	0,7 ± 0,8

**Tabla G-1.** Resultados del ejercicio para priorizar la instrumentación y las actividades entre las regiones de especial interés

actividades deben llevarse a cabo tanto en los centros nacionales como en el centro internacional. De esta manera, las inversiones existentes en instrumentos nacionales podrían aprovecharse para proporcionar la información comparativa que será necesaria para responder a las preguntas científicas de SZ4D.

## RESUMEN DE HALLAZGOS Y RECOMENDACIONES

La clave para el éxito de la iniciativa SZ4D es seleccionar un conjunto adecuado de centros donde se estudien mejor los fenómenos identificados en las preguntas científicas. Llevamos a cabo un proceso que primero descartó sitios inapropiados (basándonos en la presencia/ausencia de factores que impidieron que uno de los grupos de trabajo abordara sus preguntas científicas y la consideración logística de trabajar de forma segura en una región). A continuación, recopilamos las propiedades de los posibles segmentos de zona de subducción para identificar aquellos que mejor satisficían las necesidades de cada grupo de trabajo e intersectorial, y comparamos las propiedades de los segmentos para aislar los factores de interés. La RCN de SZ4D también señaló que las preguntas científicas se responderían mejor comparando un sitio internacional con uno o más sitios nacionales. Utilizando la compilación

y las restricciones, identificamos tres regiones de especial interés: las zonas de subducción chilenas, de Cascadia y de Alaska. La RCN de SZ4D favoreció fuerte y claramente el despliegue de la mayor parte de la instrumentación a lo largo del sistema de zona de subducción chileno, mientras que las actividades científicas y de difusión se realizaron mejor en las tres regiones de especial interés. De esta manera, SZ4D prevé el despliegue de las redes instrumentales propuestas a lo largo de la zona de subducción chilena, pero la ciencia se llevará a cabo tanto a nivel internacional como nacional para aprovechar la infraestructura nacional existente y proporcionar un impacto directo a las prioridades de evaluación de peligros nacionales.

# SINERGIAS TÉCNICAS Y DE DATOS

## CREACIÓN DE ASOCIACIONES PARA UN SZ4D INTEGRADOR

El estudio de los peligros geológicos sísmicos, volcánicos y de movimiento de masa de la zona de subducción puede beneficiarse en gran medida de una estrategia de investigación que incluye desarrollar asociaciones internacionales existentes y aprovechar la instrumentación y las instalaciones, la gestión de datos y la ciberinfraestructura, y las actividades de desarrollo de capacidades que son comunes a todas las investigaciones de peligros geológicos. Al perseguir un enfoque regional común, SZ4D puede desarrollar asociaciones con científicos y organizaciones internacionales, implementar estratégicamente una infraestructura física compartida y recopilar información contextual, como el mapeo geológico y la geocronología, que permite la interpretación multidisciplinar de los peligros geológicos. Los procesos mecánicos compartidos, la geografía y los modos de interacción con las sociedades para promover la mitigación de peligros requieren asociaciones para crear el potencial de avanzar significativamente en la investigación de peligros geológicos.

## ASOCIACIONES

El enfoque geográfico de SZ4D requiere el fomento de asociaciones nuevas y la expansión de las existentes. Las colaboraciones internacionales son complejas y requieren una inversión significativa para establecer conexiones diplomáticas, culturales y físicas. Por lo tanto, SZ4D aprovechará los vínculos científicos activos cuando sea posible. Esto es particularmente cierto cuando se realiza un esfuerzo de desarrollo de capacidades, como se describe en el **Capítulo 4.1 Desarrollo de equidad y capacidad geocientífica** de este informe y se resume a continuación.

## INSTRUMENTACIÓN E INSTALACIONES COMUNES

La ciencia que persiguen los grupos de trabajo individuales comparte muchas necesidades comunes de infraestructura física, incluida una red de tecnologías de observación in

situ, capacidad para apoyar experimentos de campo y/o campañas enfocadas, acceso y soporte a instalaciones de laboratorio para análisis geoquímicos y geocronológicos, así como experimentos mecánicos, un modelado colaborativo para liderar la integración de datos con escala cruzada, y modelos de proceso para una mejor comprensión de toda la dinámica del sistema (como se describe en el **Capítulo 4.2 Modelado colaborativo para la subducción**).

Durante la primera parte del siglo XXI, los rápidos avances tecnológicos nos han permitido observar fenómenos de zonas de subducción en cuatro dimensiones con una resolución temporal y espacial sin precedentes. Desde fosas hasta volcanes, prevemos que la investigación futura incluirá un conjunto de sistemas de detección cuasipermanentes implementados en campo para recopilar datos de series temporales sobre procesos activos. La suite puede incluir elementos geodésicos del fondo marino (GPS acústicos y de presión) y de sismometría en una red, idealmente con capacidad de transmisión de datos en tiempo real (o al menos con latencia mínima) y potencialmente incluir observatorios basados en perforaciones, para detectar la acumulación de tensión elástica y su liberación en una amplia gama de escalas espaciales y temporales (p. ej., eventos de bloqueo, deslizamientos lentos y temblores). En tierra, las redes geodésicas y sísmicas existentes destinadas a capturar la deformación relacionada con el ciclo sísmico (p. ej., el Observatorio de Límites de Placa EarthScope) podrían mejorarse y expandirse a otros países, de forma similar a los esfuerzos ya realizados en Chile. A escala volcánica, las nuevas misiones de radar de apertura sintética (SAR) como la misión SAR de la NASA-ISRO (INSAR) con cobertura semanal mejorarán en gran medida las mediciones de deformación y deben complementarse con un conjunto de instrumentos multidisciplinarios basados en tierra.

El acceso a ciertas instalaciones, incluso si no están necesariamente dedicadas exclusivamente a SZ4D, será fundamental para permitir estos esfuerzos de observación previstos. En el entorno marino, el programa necesitará tener acceso a

los buques de superficie para el despliegue de instrumentos, la recuperación y la observación del fondo marino, incluida la inmersión profunda, y el acceso a vehículos subacuáticos autónomos (AUV) y/o vehículos operados a distancia (ROV). Será necesario disponer de un conjunto de instrumentos modernos de sismometría de fondo oceánico/presión de fondo oceánico (OBS/OBP) para el programa, junto con otras tecnologías sísmicas y geodésicas emergentes. Igual de importante es la capacidad de obtener imágenes de alta resolución del fondo marino (batimetría y retrodispersión) y de la subsuperficie (reflexión y refracción sísmicas y electromagnéticas). SZ4D también necesita un acceso continuo a una capacidad de perforación profunda en el fondo marino, así como a embarcaciones y herramientas que puedan descargar datos de forma flexible y/o autónoma de los instrumentos del fondo del mar, probablemente incluyendo AUV/ROV y deslizadores autónomos.

Los diferentes componentes de MegaArray, VolcArray y SurfArray pueden superponerse fuertemente entre sí en algunas configuraciones geográficas. Estas necesidades superpuestas son más fuertes en el caso de la instrumentación terrestre, que constituye una red instrumental combinada a la que nos referimos como **red multipeligro multidisciplinar (Multi<sup>2</sup>Array)**. Los componentes principales de Multi<sup>2</sup>Array consistirían en redes sísmicas multiuso compartidas, sistemas de observación de deformación superficial y programas de obtención de imágenes superficiales de alta resolución. En primer lugar, los tres grupos de trabajo disciplinares requieren observaciones sismológicas en tierra: El FEC requiere un conjunto de sismómetros centrales en tierra para detectar la actividad de fallas de antearco y para resolver la sismicidad a lo largo de partes del Megathrust de subducción; MDE requiere una distribución densa de sismómetros en un área amplia (20-100 km de diámetro) alrededor de sistemas volcánicos específicos, junto con redes dispersas de sismómetros proximales (dentro de ~5-10 km de respiraderos) en un mayor número de volcanes; L&S requiere instrumentación a lo largo del antearco y el arco volcánico para

detectar y localizar potencialmente grandes fallas de masa, como deslizamientos de tierra y flujos de detritos. En segundo lugar, las mediciones de deformación superficial derivadas de GNSS en tierra son una piedra angular para responder a las preguntas de investigación prioritarias de cada grupo: FEC requiere densificación a lo largo de estructuras potencialmente activas y deslizantes en toda la región del antearco; MDE requiere redes geodésicas densas alrededor de estructuras volcánicas dirigidos; y L&S requiere una amplia distribución de mediciones de GNSS. En tercer lugar, todos los grupos requieren imágenes topográficas y ópticas de alta resolución de la superficie de la Tierra: FEC detectará y caracterizará fallas y pliegues activos del antearco; MDE detectará cambios en cráteres volcánicos y otras partes de las estructuras que acompañan a los desequilibrios; y L&S identificará áreas donde se pueden generar eventos de transporte de masa y los cambios que estos eventos pueden producirse aguas abajo de estas características. Los tres grupos necesitan campañas de recopilación de datos institucionales y misiones de imágenes basadas en drones para resolver los cambios en la superficie terrestre resultantes de los peligros geológicos de la zona de subducción. Juntos, estas necesidades colectivas encapsuladas en la Multi<sup>2</sup>Array proporcionan varias ventajas con respecto a la redes disciplinares individuales: son más rentables debido a la reutilización de observaciones para la caracterización de diferentes peligros, lo que permite la densificación estratégica de las mediciones en áreas donde los fenómenos estudiados pueden resolverse mejor, y proporcionan un conjunto común de observaciones para investigaciones multidisciplinarias adicionales sobre cómo estos conjuntos de procesos pueden interactuar entre sí para producir peligros en cascada en todo el sistema de zona de subducción.

Por último, todos los grupos de trabajo describieron el trabajo que dará lugar a la recogida de muestras geológicas. Estas muestras físicas deberán almacenarse y distribuirse a la comunidad para su análisis. Los materiales y estándares de referencia de la comunidad también requerirán almacenamiento y

distribución previa solicitud. Las instalaciones compartidas garantizarán la uniformidad en cómo se almacenan y manejan las muestras y sus metadatos.

Junto con las campañas de campo, se requerirá un esfuerzo de laboratorio coordinado similar para abordar muchos de los procesos esenciales que impulsan los fenómenos de subducción. Por ejemplo, los proyectos de perforación, incluido el experimento de zona sismogénica de la fosa de Nankai (NanTroSEIZE), JFAST y el Observatorio en profundidad de la Falla de San Andrés (SAFOD), han proporcionado muestras y un marco para experimentos de fricción mecánica de laboratorio (junto con muchas otras propiedades físicas) que han llevado a avances en la comprensión de la física del bloqueo, deslizamiento sísmico, transientes y comportamiento condicional. A niveles más profundos en la interfaz de la placa, se necesitan experimentos de laboratorio para dilucidar la presión y la temperatura de las reacciones de deshidratación, y las relaciones entre la deformación, los fluidos de los poros y las reacciones químicas. Existe una brecha en las capacidades experimentales en gran parte de la zona sismogénica, incluida la misma región donde los deslizamientos pasan de sísmico a asísmico, lo que requiere nuevos equipos y enfoques para acceder a estas condiciones críticas. Un desafío destacado en la petrología experimental es el desarrollo de geobarómetros precisos, que carecen de sistemas volcánicos/plutónicos, que limitarían las profundidades de estancamiento y almacenamiento del magma.

Como programa que se centra en observaciones 4D, series temporales y evolución temporal, SZ4D requiere geocronología. Se necesita una amplia variedad de enfoques para acceder a la evolución 4D del sistema de subducción, desde minutos hasta los años de ascenso magma registrados en la zona química de los cristales volcánicos, pasando por las señales geodésicas multidecadales a través de los ciclos sísmicos, desde la estratigrafía de coral hasta miles de años de denudación tectónica registrada en isótopos cosmogénicos desde la superficie terrestre, pasando por la construcción de corteza de arco

durante millones de años a partir de isótopos radiogénicos en cristales. Las observaciones en tiempo real deben integrarse con series largas para capturar completamente la dinámica de los sistemas tectónicos y volcánicos. Los laboratorios geocronológicos se distribuyen ampliamente y requieren asociaciones coordinadas con observacionalistas, modeladores y teóricos de SZ4D.

### CIBERINFRAESTRUCTURA COMÚN Y GESTIÓN DE DATOS

Las herramientas de gestión y descubrimiento de datos son partes cruciales de una infraestructura comunitaria. La ciencia interdisciplinaria solo puede prosperar cuando toda la comunidad geocientífica puede acceder y utilizar datos de todas las disciplinas, lo que a su vez requiere flujos de datos empaquetados adecuadamente y una infraestructura de datos para garantizar la disponibilidad, accesibilidad y distribución abierta de los productos de todo el esfuerzo. Este nivel de interoperabilidad requiere administradores de datos profesionales y dedicados junto con software cuidadosamente diseñado y mantenido. Es necesario crear conjuntos de datos que puedan buscarse y que incluyan metadatos totalmente descriptivos sobre incertidumbres y limitaciones. Los vínculos entre las capacidades de archivo de datos existentes, como las del Centro de Gestión de Datos (DMC) de IRIS, el Centro de Datos Sísmicos y el Programa Internacional de Descubrimiento de los Océanos (IODP), deben ser perfectos con los sistemas de gestión de datos de SZ4D. La comunicación sobre los conjuntos de datos debe integrarse en la estructura organizativa para que los usuarios potenciales conozcan, comprendan y puedan acceder a los datos desde múltiples disciplinas. Para algunas disciplinas, estas herramientas de datos están maduras (p. ej., el DMC de IRIS para datos sísmicos), mientras que para otras

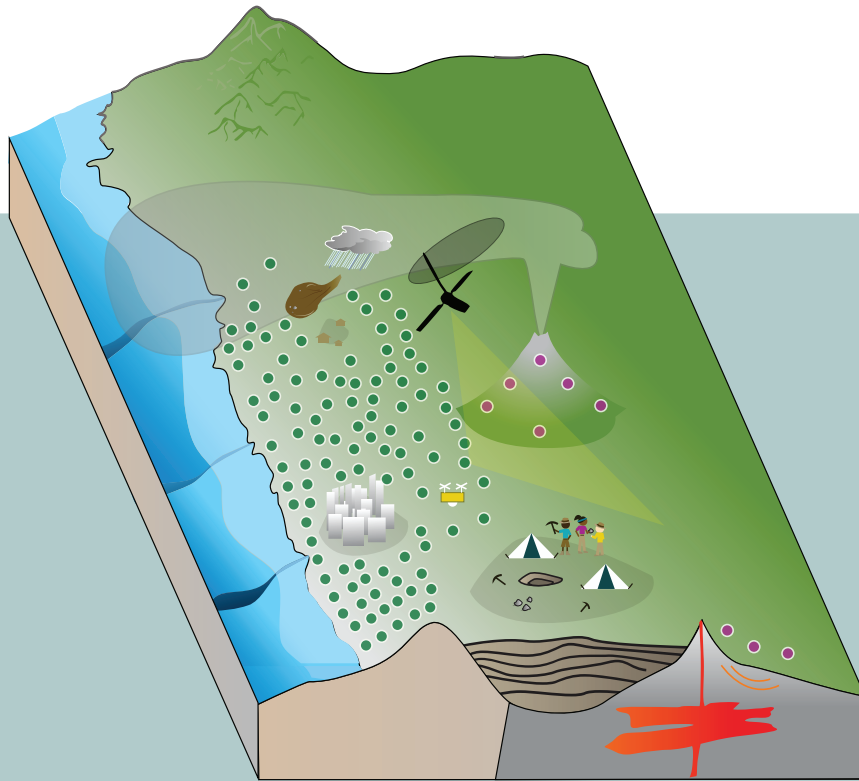
disciplinas, estas herramientas requieren un mayor desarrollo.

### ACTIVIDADES DE DESARROLLO DE CAPACIDADES

El desarrollo de capacidades fomenta las asociaciones científicas internacionales, con la intención de transferir habilidades, datos, tecnología y experiencia. Un esfuerzo compartido de desarrollo de capacidades de SZ4D se alinearán con los objetivos científicos tanto en los países emergentes como en los en desarrollo para mantener la infraestructura física, formar a los científicos, comprender los peligros y desarrollar la resiliencia. Dada la importancia global de los peligros de la zona de subducción, su diversidad científica y la necesidad de estudiarlos en múltiples ubicaciones, un esfuerzo de desarrollo de capacidades es tanto un imperativo social como una necesidad científica que puede producir resultados transformadores en todos los frentes.

Un programa SZ4D exitoso conducirá a descubrimientos científicos y aplicaciones que de otro modo no serían posibles. La infraestructura física e intelectual combinada permitirá observaciones en 4D que de otro modo no se recopilarían. Para lograr la visión de SZ4D de una nueva comprensión de los procesos y peligros de la zona de subducción, se requiere un nivel suficiente de financiación científica para analizar, integrar y sintetizar estas nuevas observaciones. Una clave para tener éxito en este equilibrio en un plazo de 10 años o más es construir mecanismos que preserven la agilidad científica. Los objetivos a largo plazo de la Iniciativa SZ4D requerirán socios internacionales y un marco que dure más que su construcción, beneficiando a la comunidad científica después de 10 años.

### *Multi<sup>2</sup>Array: Un observatorio integrado de peligros geológicos en la zona de subducción*



Prevedemos que la red instrumental de múltiples peligros y multidisciplinar (Multi<sup>2</sup>Array) está compuesta por una red de observación unificada diseñada para capturar los efectos integrados de los movimientos sísmicos, el desequilibrio volcánico, las fallas de masa y el transporte en superficie. Multi<sup>2</sup>Array mejora las necesidades observacionales de los grupos disciplinares mediante la implementación de instrumentos en una geometría en la que las observaciones centrales para algunas aplicaciones sirven como observaciones de campo lejano para otras. Además, una red integrada de este tipo probablemente ahorrará costes al colocar instrumentos en áreas en las que están bien configurados para múltiples aplicaciones y equipar estas redes multiuso con mecanismos comunes de procesamiento, almacenamiento y transferencia de datos. Multi<sup>2</sup>Array está diseñada para incluir instrumentos que puedan aprovecharse mediante los tres esfuerzos disciplinares (FEC, MDE, L&S), y por lo tanto consiste solo en partes en tierra de MegaArray, VolcArray y SurfArray implementadas en una región geográfica común.

# FASES

## UN ENFOQUE POR FASES PARA UNA IMPLEMENTACIÓN EXITOSA

La escala y el alcance del programa integral propuesto requieren un enfoque de implementación cuidadosa por fases, descrito mediante borradores de plazos (**Figuras P-1 y P-2**).

**FASE 0** | A través de actividades respaldadas por la RCN de SZ4D, SZ4D ya ha completado en gran medida la **Fase 0**, incluyendo:

- Desarrollar este plan de implementación,
- Identificar los datos disponibles que abordan los temas científicos y las brechas de datos que deben cubrirse,
- Abarcar los desarrollos técnicos y las necesidades científicas de la fuerza laboral necesarios, y
- Desarrollar un enfoque específico de SZ4D para el desarrollo de capacidades basado en principios de pertenencia, acceso, justicia, equidad, diversidad e inclusión (BAJEDI).

**FASE 1** | Se desarrollarán diseños detallados de experimentos y protocolos analíticos, tecnología y asistencia de instalaciones y centros de datos para satisfacer necesidades científicas posteriores, mientras que SZ4D persigue simultáneamente actividades de modelado y esfuerzos de campo a nivel de reconocimiento piloto. También prevemos el inicio de un programa científico y un programa de participación comunitaria durante la **Fase 1**.

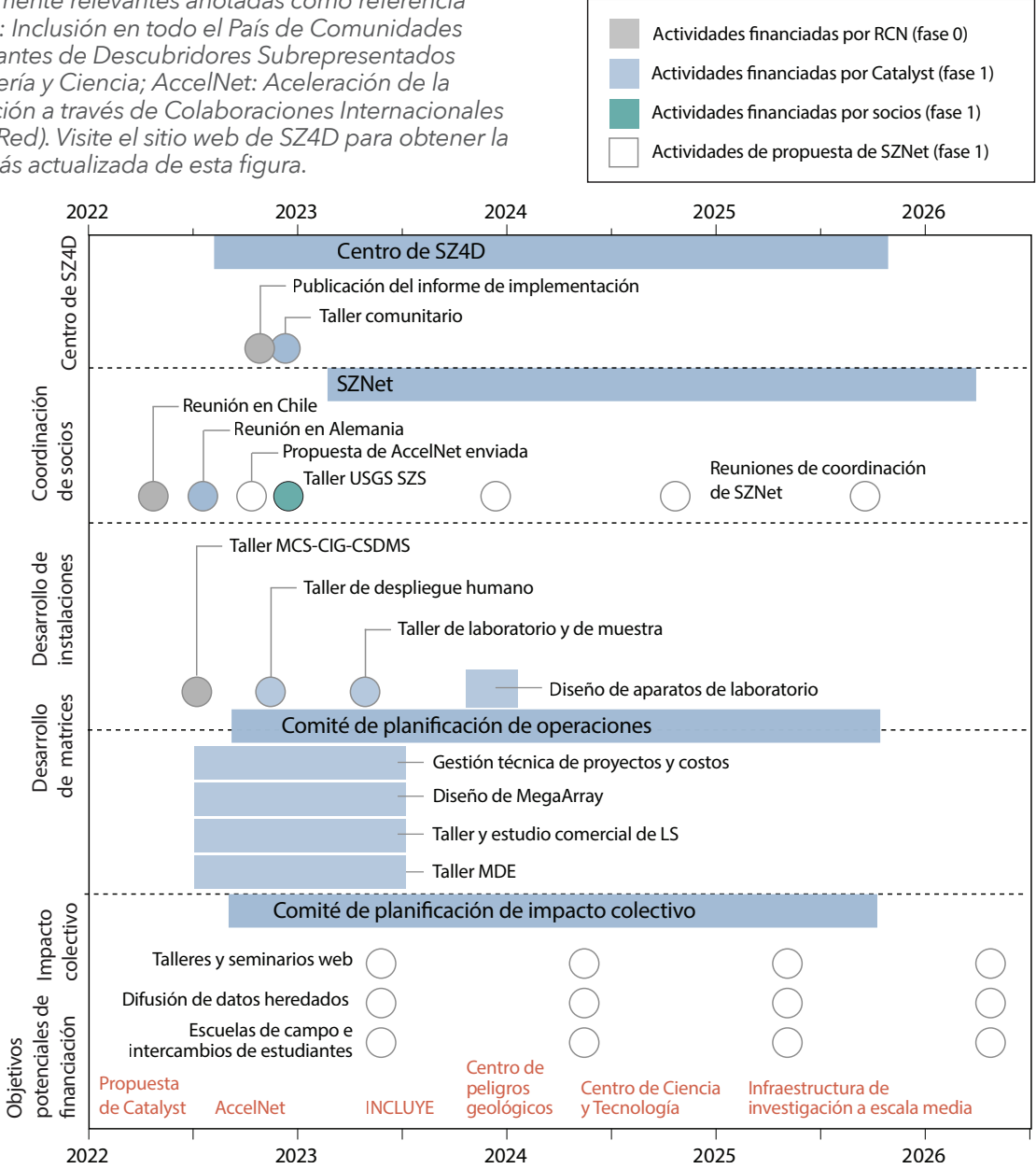
**FASE 2** | Se llevarán a cabo campañas de campo a escala decadal (redes instrumentales), con el apoyo de las instalaciones y el centro de datos de SZ4D, para recopilar las observaciones completas necesarias para analizar los sistemas de subducción y sus peligros geológicos. Las redes instrumentales se complementarán y coordinarán con esfuerzos de campo a una escala de décadas. Las redes instrumentales también se guiarán por el desarrollo de modelos y la investigación de laboratorio, y a su vez se guiarán por ellos. Un Programa de Ciencias apoyará actividades de investigación específicas y de síntesis en coordinación con un programa de Compromiso con la Comunidad.

**FASE 3** | Los resultados finales de todas las actividades de SZ4D se analizarán, sintetizarán y notificarán a la comunidad a través de publicaciones revisadas de forma externa por expertos e informes de SZ4D.

Los hitos de financiación impulsan en gran medida el cronograma de transición entre fases. La financiación exitosa para la implementación del programa de infraestructura completo marcará la transición a la **Fase 2**. La transición a la **Fase 3** tendrá lugar diez años o más después del inicio de la **Fase 2**.

Las principales categorías de actividad en las **Fases 1-3** incluyen Desarrollo y Operación de Instalaciones, Gestión de Datos, Infraestructura/ Redes Instrumentales Comunitarias, Esfuerzos de Campo Comunitarios, Actividades de Programas Científicos y Compromiso con la Comunidad. En la **Figura P-2** se ilustra una lista de actividades específicas bajo cada categoría (puede encontrar detalles adicionales en los **Capítulos 2 y 3**).

**Figura P-1.** Cronograma de las actividades de las Fases 0 y 1 para la implementación de SZ4D. Solicitudes de financiación potencialmente relevantes anotadas como referencia (INCLUYE: Inclusión en todo el País de Comunidades de Estudiantes de Descubridores Subrepresentados en Ingeniería y Ciencia; AccelNet: Aceleración de la Investigación a través de Colaboraciones Internacionales de Red a Red). Visite el sitio web de SZ4D para obtener la versión más actualizada de esta figura.



		Fase 1	Fase 2	Fase 3
		1-3 años	Más de 10 años	Más de 5 años
<i>Instalaciones</i>				
	Duración prevista			
	Desarrollo de instalaciones			
	Funcionamiento de las instalaciones			
<i>Gestión de datos</i>				
	Desarrollo del centro de datos			
	Funcionamiento del centro de datos			
<i>Infraestructura/matrices comunitarias</i>				
	Diseño y desarrollo de tecnología			
	Permisos y construcción			
	Despliegues dispersos/de columna vertebral			
	Despliegues densos/relleno de agujeros			
	Programa de respuesta rápida			
	Desmantelamiento/transferencia de matriz instrumental			
<i>Esfuerzos de campo comunitarios</i>				
	Trabajo de campo de reconocimiento			
	Mapeo topográfico y batimétrico			
	Trabajo de campo geológico			
<i>Programa de ciencias</i>				
	Actividades de investigación inmediata			
	Actividades de investigación			
	Programa de detección remota			
	Actividades de síntesis científica			
<i>Compromiso con la comunidad</i>				
	Compromiso con la comunidad científica			
	Educación pública y difusión			

**Figura P-2.** Cronograma de las principales actividades en las fases 1-3 de SZ4D. Consulte este capítulo y los capítulos 3 y 4 para obtener más detalles.

# ESTRUCTURA Y GOBERNANZA DEL PROGRAMA



## DESPLAZAMIENTO DE SZ4D HACIA DELANTE, JUNTOS

Para lograr los ambiciosos objetivos de SZ4D se necesitan estructuras de gestión y gobernanza capaces de:

1. Apoyar de forma eficiente y eficaz una infraestructura significativa, incluidos los instrumentos implementados en el campo y en laboratorios, el acceso abierto a datos casi en tiempo real, un modelado colaborativo y otros nuevos consorcios SZ4D, y el despliegue de científicos para realizar mediciones críticas y sistemáticas
2. Permitir e inspirar **investigaciones innovadoras** respaldadas por la financiación impulsada por propuestas, incluida la financiación inicial
3. Coordinar las disciplinas de SZ4D, los centros de enfoque y los temas

intersectoriales; coordinar con las agencias de financiación; implementar un modelo de impactos colectivos en todas las comunidades para garantizar el máximo impacto social; desarrollar el programa SZ4D a medida que cambian las necesidades y surgen descubrimientos y circunstancias imprevistas; comunicarse con socios internacionales, operativos y de partes interesadas; y ejecutar la gobernanza comunitaria.

El modelo propuesto para estas estructuras de gestión y gobernanza proporcionaría orientación y supervisión independiente de tres componentes principales de SZ4D:

1. Un **centro** que gestiona y coordina instalaciones SZ4D,

2. Cinco **instalaciones** que proporcionan soporte para el desarrollo, adquisición, despliegue y gestión de datos de instrumentos, y
3. Un **programa científico** en NSF cuyo mandato sería identificar los proyectos de investigación centrados en SZ4D más prometedores a través de un proceso de revisión de méritos.

### CENTRO Y GOBERNANZA DE SZ4D

Para garantizar la ejecución exitosa de la iniciativa de SZ4D, se establecerá una estructura de gobernanza para guiar la evolución del programa, evaluar el progreso, coordinar todas las comunidades involucradas, garantizar la transferencia de información y fomentar las asociaciones para SZ4D. Los organismos de supervisión y la estructura de gestión prevista coordinarán el programa en todos los niveles, permitiendo a la comunidad construir la infraestructura intelectual de SZ4D requerida y crear un programa que sea mayor que la suma de sus partes.

Se ha desarrollado e implementado una propuesta de estructura de gobernanza de transición diseñada para satisfacer las necesidades actuales de SZ4D basada en los comentarios de la comunidad y las instalaciones (**Figura SG-1**). Esta estructura inicial es sencilla y consta de un Comité Directivo y un Comité Ejecutivo que supervisan el trabajo del centro de SZ4D. Estos dos comités se guían por las aportaciones de tres grupos de trabajo y dos grupos integradores más dos comités de planificación. En la estructura de transición, los miembros del comité desempeñan más de un papel (p. ej., los miembros del Comité Ejecutivo también forman parte del Comité Directivo, los presidentes de grupos de trabajo e integradores también forman parte del Comité Directivo). A

continuación describimos con más detalle los cargos de estructura del comité de transición.

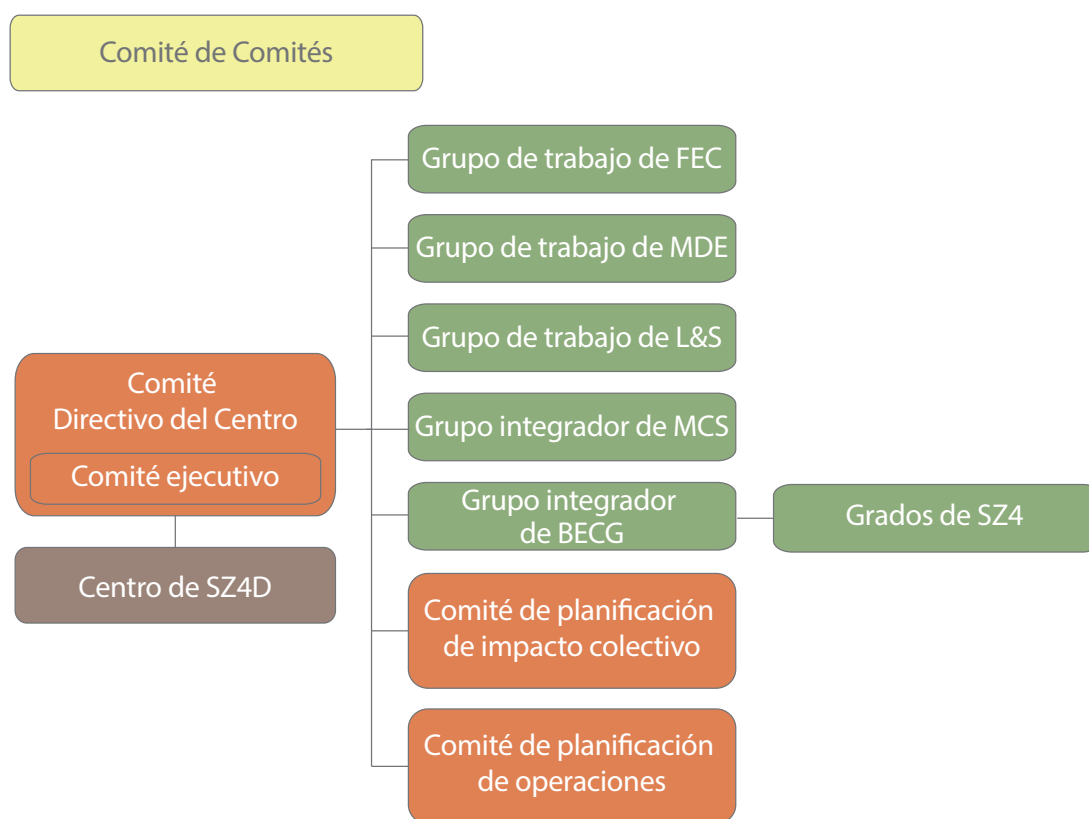
### Gobernanza

#### *Comité de Comités (CoC)*

El CoC desarrolla listas de candidatos para los comités (naranja) y los grupos de trabajo e integradores (verde) definidos en la **Figura SG-1**. Combina nominaciones de cada comité, voluntarios de la comunidad y científicos identificados por las propias deliberaciones del CoC para garantizar el equilibrio de diversidad por disciplina, institución y características demográficas. Los comités, así como los grupos de trabajo e integradores, pueden incluir miembros nacionales e internacionales. El CoC recomienda listas de candidatos para cada uno de los comités y grupos de trabajo e integradores al Comité Directivo del Centro, así como copresidentes para cada comité y grupo. Los plazos de tres años se escalonarán de manera que cada año el CoC recomiende una pizarra con un objetivo de dos tercios de los miembros actuales y un tercio de los nuevos miembros. El CoC tiene como objetivo los rangos en números de membresía (descritos a continuación), pero está facultado para ajustar según sea necesario para maximizar la participación en SZ4D. El tamaño objetivo es de 5 a 10 miembros.

#### *Comité Directivo del Centro (SC)*

El SC coordina y supervisa todas las actividades de SZ4D. El SC también se encarga de supervisar las operaciones generales de SZ4D, lo que incluye garantizar un calendario de reuniones adecuado, utilizar eficazmente el balance para avanzar en las metas de SZ4D y resolver los objetivos competitivos entre el Comité Asesor de Impacto Colectivo y los grupos de trabajo. El SC tomará decisiones estratégicas importantes. Todas las propuestas que comprometan al personal e instalaciones de SZ4D deben ser aprobadas por el SC.



**Figura SG-1.** Diagrama organizativo que muestra la estructura del Comité Transitorio de SZ4D. La estructura de transición conserva los grupos de trabajo e integradores (cuadros verdes), a la vez que añade un Comité de Planificación de Operaciones e Impacto Colectivo. Todas estas entidades informan al Comité Directivo del Centro que supervisa el centro de SZ4D. El Comité de Comités es una entidad independiente encargada de rellenar los miembros de los comités y grupos de trabajo e integradores.

El SC actual aprueba las nominaciones de comités y el grupo de trabajo e integrador proporcionadas por el CoC. El SC asigna enlaces a todos los demás comités de la afiliación al SC. El tamaño objetivo del SC es de entre 15 y 20 miembros. El presidente del SC es responsable de dirigir las reuniones del SC, servir como punto de contacto para socios y agencias externos, organizar y facilitar el establecimiento de la agenda para SZ4D y presidir el Comité Ejecutivo.

#### Comité Ejecutivo (ExCom)

Un subcomité de SC sirve como ExCom, que se reúne con más frecuencia que el SC y selecciona información para las decisiones del SC. El ExCom se encarga de desarrollar y coordinar estrategias, responder a las oportunidades de financiación y buscar posibles asociaciones. ExCom y sus miembros también pueden servir

como puntos de contacto con agencias y socios internacionales según sea necesario. Durante el período de transición, el ExCom inicialmente conservará su membresía actual e instituirá plazos escalonados de tres años para actualizar su membresía a medida que SZ4D crezca. Los PI de la propuesta de Catalyst de SZ4D conservan funciones por virtud de oficio siempre que las actividades del centro estén cubiertas por esa beca. Los PI frutos del centro asumirían las mismas funciones por virtud de oficio. El tamaño objetivo del ExCom sería de seis miembros.

#### Comité Asesor de Impacto Colectivo (CIC)

El CIC apoya las prioridades científicas y los impactos más amplios al supervisar las actividades científicas y de desarrollo de capacidades de SZ4D y asesorar al SC sobre formas de cumplir mejor los objetivos de impacto colectivo de SZ4D, como la

redistribución de recursos. El CIC está compuesto por representantes de cada uno de los miembros activos de las comunidades disciplinares, los grupos integradores y los comités de las instalaciones. En este comité se incluye experiencia en la relevancia científica para las agencias más allá de la NSF (p. ej., NASA, USGS, NOAA). Los copresidentes del CIC informarán regularmente al SC. El tamaño objetivo del CIC es de entre 15 y 20 miembros.

### *Comité de planificación de operaciones (OPC)*

El OPC supervisa las necesidades operativas de SZ4D. Inicialmente, el OPC se encarga de proporcionar orientación científica para el diseño de cinco instalaciones que apoyarían:

1. Instrumentación marina,
2. Instrumentación terrestre,
3. Programas de campo que requieren despliegue humano,
4. Un modelado colaborativo, y
5. Experimentos y archivo de muestras.

El OPC trabajará para desarrollar las propuestas necesarias para respaldar la nueva infraestructura. A medida que se crean y ponen en funcionamiento las instalaciones de SZ4D, se espera que el OPC cree comités de supervisión separados para cada una de ellas. La afiliación objetivo es de 15 a 20, con un equilibrio de experiencia relevante para las cinco instalaciones futuras previstas. La experiencia en la gestión de datos también puede ser fundamental para el trabajo de este comité. Los miembros tendrán plazos escalonados de tres años.

### *Grupos de trabajo y grupos integradores*

Durante el período de transición, los grupos de trabajo (FEC, L&S, MDE) y los grupos integradores (BECG, MCS) mantendrán la actividad con membresías actualizadas. Estos grupos se consideran representativos de la comunidad y deben consultar regularmente

con los miembros de la comunidad para garantizar la alineación entre las necesidades de la comunidad y las acciones de SZ4D. El tamaño objetivo para cada grupo de trabajo e integrador es de 15 a 20 miembros.

Cualquier comité puede convocar subcomités adicionales de manera puntual de experiencia especializada según sea necesario a medida que SZ4D pase a una configuración totalmente construida. Una vez que se asegure la financiación para una actividad en particular, el SC debe analizar las funciones ex officio apropiadas para el PI de la actividad.

## Gestión

El **Director Ejecutivo** del centro de SZ4D será directamente responsable ante el Comité Directivo del Centro. Esta estructura distancia la gestión y ejecución de las direcciones y prioridades científicas especificadas de la gobernanza que las define. El personal profesional a tiempo completo del centro de SZ4D proporcionará continuidad, responsabilidad, puntos de contacto, dirección y gestión para el programa.

También prevemos que pueden surgir necesidades de datos que no están definidas al inicio de las nuevas instalaciones de SZ4D y que se describen a continuación. Además, puede ser necesaria una capacidad de respuesta rápida ágil y basada en eventos para capturar los fenómenos que deseamos comprender como parte de SZ4D. Debido a que existen muchas respuestas y tipos de datos potenciales, hemos diseñado un mecanismo de recopilación de datos críticos para dirigir los recursos a las instalaciones y entidades adecuadas en caso de que se deban recopilar datos nuevos rápidamente, o se deban realizar actividades para garantizar que todas las partes del proyecto SZ4D encajan correctamente. Este mecanismo de recopilación de datos críticos será supervisado y las acciones serán aprobadas directamente por el Comité Directivo del Centro. Estas necesidades científicas se comunicarán al director ejecutivo, quien determinará las instalaciones y entidades

adecuadas para la recopilación de datos críticos. Este mecanismo está destinado a permitir la identificación y recopilación de necesidades de datos emergentes que requieren una asignación flexible de recursos a combinaciones de instalaciones y entidades, a la vez que se protege contra un programa de financiación científica ad hoc basado en el centro.

## INFRAESTRUCTURA E INSTALACIONES

SZ4D requerirá instalaciones nuevas y asociaciones con instalaciones existentes. Una combinación de instalaciones nuevas y existentes respaldará el desarrollo de instrumentos (p. ej., el fondo marino), el establecimiento de redes de instrumentos (p. ej., redes de sensores de volcanes), despliegues de campo de instrumentos en tierra y en el mar, y la recopilación de datos que requiere personas como instrumentos de observación principales (p. ej., paleosismología y cronología volcánica). Se prevén nuevos consorcios, como el Modelado colaborativo para la subducción y el Consorcio de Laboratorio y Muestras, para cumplir con los objetivos de SZ4D. Las instalaciones específicas que son esenciales para apoyar la investigación de SZ4D incluyen:

- Instrumentación sísmica, geodésica **marina** y de otro tipo, piscinas de instrumentos, equipos de movilización y embarcaciones marinas (con tripulación y autónomas) de nuevo diseño para el despliegue, servicio y respuesta rápida cerca de los sitios de despliegue denso. La comunidad estadounidense de la tierra sólida no ha intentado anteriormente un observatorio de zona de subducción marina de este alcance y duración. Esta instalación en el fondo marino debe tener la capacidad de responder rápidamente (de horas a días) tanto a problemas como a oportunidades y, por lo tanto, implica personal dedicado y recursos de navegación marítima.
- Redes instrumentales terrestres **de nuevo**

**diseño**, que incluyen redes instrumentales volcánicas con telemetría satelital para transmitir datos casi en tiempo real; redes de observación ambiental para detección de relieves y deformaciones; redes instrumentales desplegables para una respuesta rápida en regiones con poca infraestructura previa.

- Apoyo (p. ej., para logística, instrumentación de muestreo y análisis) para programas de campo que impliquen el **despliegue de humanos** como instrumentos de observación principales para recopilar datos sistemáticos, estandarizados y críticos que incluyan paleosismología, mapeo del marco, muestreo y análisis para geocronología, geoquímica y petrología. Esto también podría implicar oportunidades para la formación de estudiantes, apoyo de posdoctorado y posdoctorado, desarrollo de capacidades y programas REU.
- **Modelado colaborativo para la subducción** para desarrollar nuevos modelos basados en la física y computación basada en datos para zonas de subducción y para proporcionar recursos para su uso por parte de toda la comunidad de investigación de SZ4D, incluidos estudiantes, postdoctorandos e investigadores.
- **Consorcio de Laboratorio y Muestras** para el estudio de las propiedades de los materiales y la reología durante la deformación y el equilibrio de fases de los sistemas fundidos, incluidos el modelado analógico y la infraestructura para archivar las muestras recogidas como parte del esfuerzo de SZ4D.

La gestión de las nuevas instalaciones caería en última instancia en el centro de SZ4D para garantizar la recopilación y coordinación coherentes de los datos a lo largo de la duración de SZ4D (**Figura SG-2**). Sin embargo, cada una de estas instalaciones necesita un acceso inmediato a la experiencia científica y un nivel

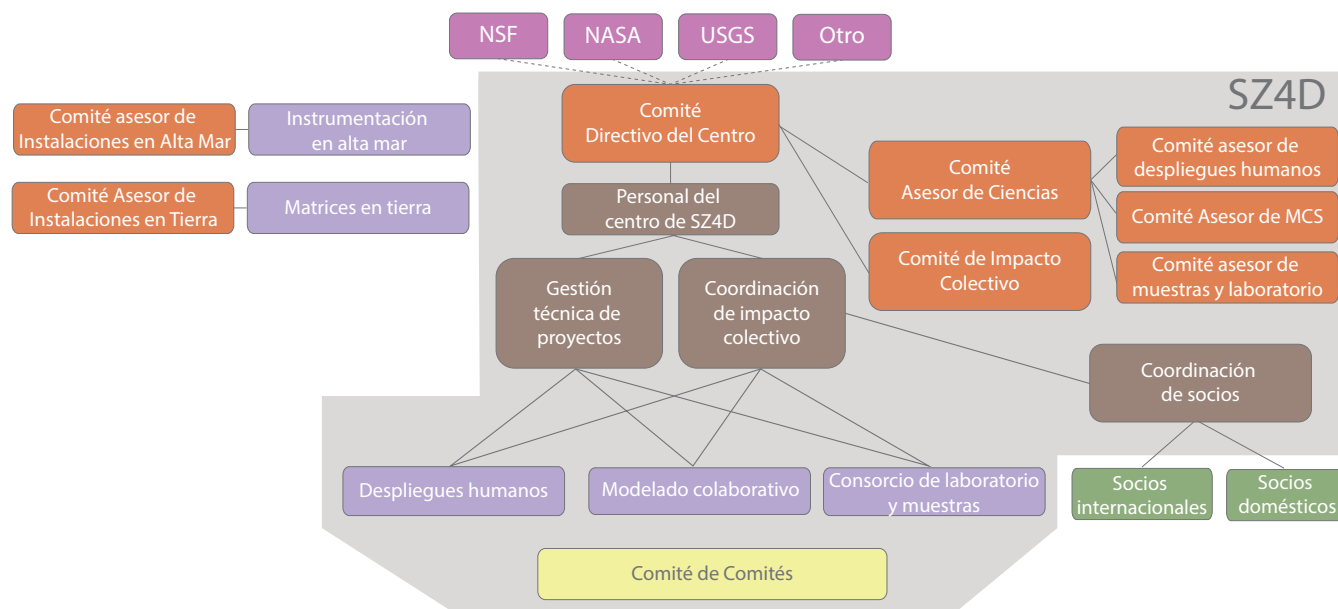
granular de supervisión de las actividades de cada una. Por lo tanto, se espera que cada componente de la instalación esté asociado con su propio comité asesor, cuya membresía se determinaría a través del proceso del Comité de Comités, y cuyos miembros cumplirían condiciones fijas. Estos comités asesores informarían al Comité Asesor de Ciencias (**Figura SG-2**). La composición rotativa de los Comités Asesores de las Instalaciones permitiría una amplia participación en el proceso de supervisión científica, a la vez que proporcionaría continuidad a la dirección de las instalaciones. Como se describió anteriormente, las actividades científicas de las instalaciones se coordinarían a través de la membresía representativa en el Comité Directivo del Centro para maximizar el impacto científico y la eficiencia a lo largo de la vida útil del proyecto de SZ4D.

Además de estas nuevas instalaciones, puede ser beneficioso ampliar las capacidades de las instalaciones y consorcios existentes, aprovechando su experiencia para apoyar la recopilación y distribución de redes y conjuntos de datos de instrumentos nuevos y novedosos. Para muchos objetivos, se prevé que SZ4D se asocie con instalaciones u organizaciones existentes o futuras, como la gestión de datos sísmicos y geodésicos con el Earthscope Consortium, la adquisición de datos de elevación de alta resolución de Topografía Abierta o la recopilación de datos geocronológicos con el Consorcio Nacional de Geocronología. Además, muchas organizaciones gestionan con éxito el despliegue en campo de instrumentos sísmicos y geodésicos en tierra, incluido el EarthScope Consortium (ESCO, sucesor de IRIS/UNAVCO) y el Programa de Peligros de Terremotos de USGS. Las organizaciones especializadas en el archivado de datos geofísicos y el acceso en tiempo real a los datos son NASA-JPL, IRIS/UNAVCO y los centros de datos de terremotos y observatorios de volcanes del USGS. Para petrología experimental, geoquímica y archivo y acceso a datos estructurales, la Biblioteca de Relaciones de Fase Experimental (LEPR), la Habilidad de la Integración del Conocimiento

(ENKI), la Geoquímica de las Rocas del Océano y los Continentes (GEOROC), la Alianza Interdisciplinaria de Datos de la Tierra (IEDA), PetDB y Strabospot son excelentes ejemplos de los esfuerzos existentes en la base de datos. El Consorcio Nacional de Geocronología es un socio natural para la adquisición y el archivo de datos geocronológicos. Los datos de topografía y batimetría de alta resolución se adquieren, archivan y comparten a través del Centro Nacional de Mapeo Aéreo Laser (NCALM), el Programa de Elevación 3D (3DEP), OpenTopography, el Sistema de Datos de Geociencia Marina e IEDA. El grupo del Centro de Instrumentos Sísmicos del Fondo Oceánico (OBSIC) será esencial en la coordinación del diseño y la implementación de componentes de sismometría del fondo oceánico, al igual que otros operadores marinos como el Sistema de Laboratorio Oceanográfico Universitario Nacional (UNOLS) y el Programa Internacional de Perforación Oceánica (IODP). Será imperativo asociarse con organizaciones internacionales para despliegues de campo importantes (p. ej., dentro de Chile, por ejemplo, el Observatorio de volcanes de los Andes del Sur [OVDAS], SERvicio NAcional de GEOlogía y MINería [SERNAGEOMIN] y muchas universidades). Será necesaria la selección de muestras físicas y experimentos para los esfuerzos coordinados, y CONVERSE, el Instituto Smithsonian e IEDA ya están desarrollando nuevos modelos. Los centros existentes como Infraestructura Computacional para la Geodinámica (CIG), Sistema de Modelo de Dinámica de Superficie Comunitaria (CSDMS) y el Centro de Terremotos del Sur de California (SCEC) son valiosos socios para el desarrollo de código, la formación y la realización de talleres temáticos. Para maximizar el impacto de SZ4D en la mitigación de peligros, serán vitales las asociaciones con los Observatorios Mundiales de Volcanes (WOVO), el Programa de Peligros del USGS, el Programa de Asistencia ante Desastres Volcánicos (VDAP), el Modelo Mundial de Terremotos (GEMS) y los centros de alerta temprana de tsunamis de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA).

# PROGRAMA CIENTÍFICO DE SZ4D

convocando un panel científico de SZ4D en NSF y otras agencias. El panel se guiaría por la revisión externa por expertos, coherente con la práctica de la agencia e independiente de la gobernanza de SZ4D. El alcance del panel podría dirigirse con solicitudes de propuestas (RFP) abiertas que se centran en ciertos problemas científicos, áreas de enfoque o actividades de integración en diferentes puntos a lo largo del cronograma de SZ4D, según lo guiado por el centro de SZ4D. Las propuestas podrían abarcar desde proyectos con múltiples PI y multidisciplinarios hasta proyectos de un solo PI. Un programa dedicado de financiación inicial de SZ4D podría servir como una vía de acceso para SZ4D, especialmente para los científicos en las primeras etapas de su carrera. Otro mecanismo para instruir y retener a los científicos en las primeras etapas de su carrera sería apoyar becas de posgrado, postdoctorandos y subvenciones de tipo CAREER de SZ4D.



**Figura SG-2.** Estructura organizativa del centro de SZ4D totalmente construido (marrón); Comités Asesores (naranja); Instalaciones (púrpura); Socios Internacionales y Domésticos (verde); agencias de financiación (rosa); Comité de Comités (amarillo). El gris marca el alcance de la comunidad de SZ4D.

## APÉNDICE I-1

## MIEMBROS DE LA RCN DE SZ4D

Geoff Abers . . . . .	Cornell University. . . . .	MDE
Colin Amos. . . . .	Western Washington University . . . . .	L&S
Kyle Anderson . . . . .	US Geological Survey . . . . .	MCS
Pete Barry . . . . .	Woods Hole Oceanographic Institution . . . . .	MDE
Beth Bartel . . . . .	Michigan Tech University. . . . .	BECG
Noel Bartlow . . . . .	University of California, Berkley . . . . .	FEC
Susan Beck. . . . .	University of Arizona . . . . .	FEC
Thorsten Becker . . . . .	University of Texas, Austin . . . . .	SC, MCS
Mark Behn . . . . .	Boston College. . . . .	ExCom, SC, MCS, L&S
Magali Billen . . . . .	UC, Davis . . . . .	MCS, FEC
Ben Black. . . . .	The City College of New York . . . . .	MDE
Emily Brodsky . . . . .	UC, Santa Cruz . . . . .	ExCom, SC, FEC
Danny Brothers. . . . .	United States Geological Survey. . . . .	L&S
Mike Brudzinski . . . . .	Miami University of Ohio. . . . .	ExCom, SC, BECG
Claire Bucholz . . . . .	California Institute of Technology . . . . .	MDE
Roland Bürgmann . . . . .	University of California, Berkley . . . . .	SC, FEC
Jackie Caplan-Auerbach. . . . .	Western Washington University . . . . .	BECG
Simon Carn. . . . .	Michigan Tech University. . . . .	MDE
Chuck Connor . . . . .	University of South Florida . . . . .	MCS
Michele Cooke. . . . .	University of Massachusetts, Amherst . . . . .	BECG, L&S
Juliet Crider . . . . .	University of Washington. . . . .	L&S
Stephen DeLong. . . . .	US Geological Survey . . . . .	L&S
Eric Dunham . . . . .	Stanford University . . . . .	SC, MCS , FEC
Alison Duvall . . . . .	University of Washington. . . . .	SC, MCS , L&S
Tobias Fischer . . . . .	University of New Mexico . . . . .	MCS
Noah Finnegan. . . . .	UC Santa Cruz . . . . .	L&S
William Frank. . . . .	Massachusetts Institute of Technology. . . . .	FEC
Andy Frassetto. . . . .	IRIS . . . . .	SC, BECG
Melodie French . . . . .	Rice University . . . . .	SC, FEC

Alice Gabriel . . . . .	.Scripps Institution of Oceanography. . . . .	MCS , FEC
Sean Gallen . . . . .	.Colorado State University . . . . .	SC, L&S
Joan Gomborg. . . . .	.United States Geological Survey. . . . .	L&S
Helge Gonnerman . . . . .	.Rice University . . . . .	MCS, MDE
Karen Gran . . . . .	.University Minnesota, Duluth. . . . .	L&S
Trish Gregg. . . . .	.University of Illinois. . . . .	MDE
Matt Haney. . . . .	.US Geological Survey . . . . .	SC, MDE
Jenna Hill. . . . .	.US Geological Survey . . . . .	L&S
George Hilley . . . . .	.Stanford University . . . . .	ExCom, SC, L&S
Mong-Han Huang . . . . .	.University of Maryland . . . . .	L&S
Chris Huber . . . . .	.Brown University . . . . .	MDE
Shaul Hurwitz. . . . .	.US Geological Survey . . . . .	MDE
Kaj Johnson . . . . .	.Indiana University, Bloomington . . . . .	MCS
Leif Karlstrom . . . . .	.University of Oregon . . . . .	SC, MCS , L&S
Adam Kent. . . . .	.Oregon State University . . . . .	SC, MDE
Eric Kirby. . . . .	.Oregon State University . . . . .	L&S
Eric Kiser . . . . .	.University of Arizona . . . . .	MDE
Jared Kluesner . . . . .	.US Geological Survey . . . . .	L&S
Nicole LaDue. . . . .	.Norhern Illinois University . . . . .	BECG
Pete LaFemina . . . . .	.The Pennsylvania State University . . . . .	MDE
Thorne Lay . . . . .	.UC, Santa Cruz . . . . .	FEC
Jeff McGuire . . . . .	.US Geological Survey . . . . .	FEC
Kristin Morell . . . . .	.UC, Santa Barbara . . . . .	SC, L&S
Yves Moussallam . . . . .	.Lamont-Doherty Earth Observatory . . . . .	MDE
Carolina Muñoz-Saez . . . . .	.University of Nevada Reno . . . . .	MDE
Madison Myers. . . . .	.University of Montana . . . . .	MDE
Samer Naif . . . . .	.Lamont-Doherty Earth Observatory, Georgia Tech . . . . .	FEC
Andrew Newman . . . . .	.Georgia Tech . . . . .	SC, BECG, FEC
Nathan Niemi . . . . .	.University of Michigan . . . . .	L&S
Anne-Marie Núñez. . . . .	.Ohio State University. . . . .	BECG
Summer Ohlendorf . . . . .	.NOAA/National Tsunami Warning Center . . . . .	FEC
Ayla Pamukcu . . . . .	.Stanford University . . . . .	MDE
Charlie Paul . . . . .	.Monterey Bay Aquarium Research Institute . . . . .	L&S
Jon Perkins. . . . .	.US Geological Survey . . . . .	L&S
Terry Plank . . . . .	.Lamont-Doherty Earth Observatory . . . . .	SC, MDE
Beth Pratt-Sitaula . . . . .	.UNAVCO . . . . .	BECG
Christine Regalla . . . . .	.Northern Arizona University . . . . .	FEC

Diana Roman . . . . .	Carnegie University. . . . .	ExCom, SC, MDE
Demian Saffer . . . . .	University of Texas Institute for Geophysics . . . . .	FEC
Steven Semken. . . . .	Arizona State University . . . . .	BECG
Donna Shillington . . . . .	Northern Arizona University . . . . .	SC, FEC
Joann Stock . . . . .	California Institute of Technology . . . . .	L&S
Danielle Sumy . . . . .	IRIS . . . . .	BECG
Amanda Thomas. . . . .	University of Oregon . . . . .	MCS
Christy Till . . . . .	Arizona State University . . . . .	SC, BECG, MDE
Harold Tobin . . . . .	University of Washington. . . . .	ExCom, SC, FEC
Aaron Velasco . . . . .	University of Texas, El Paso. . . . .	BECG
Daniel Viete . . . . .	Johns Hopkins University. . . . .	FEC
Ikuko Wada. . . . .	University of Minnesota . . . . .	MCS
Janet Watt . . . . .	US Geological Survey . . . . .	L&S
Rick Wessels . . . . .	US Geological Survey . . . . .	MDE
Lisa White . . . . .	UC, Berkeley . . . . .	BECG
Doug Wiens . . . . .	Washington University . . . . .	SC, FEC
Rob Witter . . . . .	US Geological Survey . . . . .	FEC
Heather Wright. . . . .	US States Geological Survey . . . . .	MDE
Brian Yanites . . . . .	Indiana University. . . . .	L&S
Wenlu Zhu . . . . .	University of Maryland . . . . .	MDE

## APÉNDICE FEC-1

# MATRICES DE TRAZABILIDAD DE FEC

*Las matrices de trazabilidad* muestran los vínculos entre:

1. La pregunta científica (columna A),
2. Las amplias categorías de información necesarias para abordar la pregunta (columnas B a C),
3. La información específica necesaria para abordar la pregunta (columna D) y
4. Las observaciones, modelos y experimentos necesarios para proporcionar información específica (columna E), que forman las columnas de las matrices.

Las filas de cada matriz enumeran la información y las actividades necesarias. Las actividades están codificadas por colores por categoría (p. ej., geodesia, geología) para ilustrar la amplitud de las actividades interdisciplinarias necesarias para abordar las preguntas y necesidades comunes entre preguntas científicas. El contenido de esta matriz se informa mediante debates dentro del grupo de trabajo y comentarios recibidos de la comunidad a través de encuestas y reuniones generales y de otros grupos de trabajo de SZ4D.

Describimos un ejemplo de la *matriz de trazabilidad* de la **pregunta 2** para ilustrar nuestro proceso (**A-FEC-1**). Un requisito previo para comprender los controles sobre la velocidad y el modo de deslizamiento en el espacio y el tiempo es la información sobre la velocidad y el modo de deslizamiento en sí, incluidos los terremotos y los eventos de deslizamiento lento. Las redes instrumentales sísmicas y geodésicas que cruzan el frente costero son necesarias para proporcionar restricciones en toda la gama de comportamiento de deslizamiento actual y acoplamiento geodésico desde la fosa hasta la transición descendente al arrastre asísmico (p. ej., **Figura FEC-5**). La paleosismología, la geología y los registros históricos de terremotos son necesarios para explorar la historia más profunda de dónde y cuándo se han producido grandes terremotos y tsunamis y para procesos de deformación a largo plazo para proporcionar contexto para el comportamiento actual. Diferenciar entre las teorías que se han propuesto para explicar las variaciones en el comportamiento de los deslizamientos requiere restricciones en los materiales, fluidos, y estructuras a lo largo del límite de la placa en una serie de escalas espaciales, incluidas las propiedades de fricción del material a lo largo del límite de la placa, heterogeneidades a lo largo del límite de la placa en un rango de escalas, y/o variaciones en la presión del fluido para poros (p. ej., Segall et al., 2010; Hawthorne y Rubin, 2013; Skarbek et al., 2012; Ando et al., 2012; Fagereng y den Hartog, 2016; Zhu et al., 2020). Diferenciar entre estas explicaciones competitivas de lo que controla el comportamiento de deslizamiento requiere, por lo tanto, restricciones en materiales, fluidos y estructuras a lo largo del límite de la placa en un rango de escalas espaciales. La obtención de imágenes de reflexión sísmica/CSEM puede proporcionar

restricciones en la heterogeneidad de las propiedades límite de la placa y restricciones indirectas en la porosidad y la presión de los poros-líquidos a escalas de decenas a miles de metros (p. ej., **Figura FEC-6**), mientras que la perforación de materiales de falla de la zona de subducción o estudios de Megathrust exhumados en tierra son necesarios para caracterizar la composición y estructura de los materiales de la zona de fallas, la heterogeneidad de escala más fina y las interacciones de la roca de fluidos (p. ej., **Figura FEC-7**). Se necesitan estudios experimentales sobre los materiales de la zona de subducción para determinar las propiedades del material que controlan los procesos de deslizamiento y requerirán avances en el rango de presiones, temperaturas, presiones de poros y tasas de deformación a las que se puede acceder en el laboratorio. El modelado numérico aclarará los parámetros que deben observarse y evaluarse, y sintetizará observaciones y experimentos para una comprensión completa de los controles sobre el comportamiento de la zona de subducción.

# FASES DEL EXPERIMENTO DE FEC DE SZ4D

## Fase 0 (trabajo preparatorio y perfeccionamiento del plan de implementación)

- 1.** Evaluación de la infraestructura y planificación de experimentos
  - a.** Evaluación de la infraestructura de instrumentación sísmica y GNSS existente, incluida la calidad, accesibilidad y apertura de los datos
  - b.** Esfuerzo de modelado centrado en informar del diseño óptimo de los experimentos para lograr la resolución necesaria
- 2.** Organización y planificación
  - a.** Fortalecer las conexiones nacionales e internacionales existentes y establecer acuerdos iniciales de desarrollo de capacidades, acceso, intercambio de datos y ciencias con socios internacionales para posibles sitios objetivo
  - b.** Aclarar la posible relación sinérgica entre los esfuerzos de SZ4D con la estimación de peligros y los objetivos de advertencia en las posibles regiones observatorios

## Fase 1 (Análisis y síntesis de datos existentes y actividades de planificación continua)

- 1.** Evaluación y recopilación de datos
  - a.** Síntesis y evaluación de las restricciones existentes sobre el historial y el comportamiento de la zona de subducción, incluidos los catálogos sísmicos y de tsunamis, los parámetros de la fuente de terremotos regionales, las ubicaciones y el comportamiento de deslizamientos lentos, los datos del medidor de mareas y DART, las encuestas locales para eventos históricos y las estimaciones del área de la fuente de tsunamis
  - b.** Síntesis y reprocesamiento dirigido de resultados de imágenes geofísicas anteriores de fuentes sísmicas activas y pasivas, magnetotelúricas, datos electromagnéticos de fuentes controladas y datos batimétricos terrestres y marinos
  - c.** Síntesis de datos geológicos, paleosísmicos y paleotsunamis existentes de sitios analógicos in situ y exhumados
  - d.** Acoplamiento y síntesis de los datos existentes sobre las propiedades del material (fricción, propiedades elásticas, propiedades hidráulicas) y la estructura de fallas (tanto de sistemas in situ como exhumados) para informar a los modelos e identificar brechas
  - e.** Resumen de los esfuerzos de modelado específicos de la región, como simulaciones de

modelos regionales de estrés y deformación, fallas, secuencias de terremotos y deslizamientos asísmicos, y dinámica de ruptura de Megathrust y potencial tsunamigénico y de deformación

- f.** Comenzar a desarrollar capacidades de procesamiento de datos y de ciberinfraestructura junto con organizaciones asociadas para garantizar el uso eficiente de grandes conjuntos de datos recopilados en la fase 1 y la fase 2

## 2. Desarrollo tecnológico

- a.** Desarrollo de instrumentos para despliegues en el fondo marino a largo plazo y potencialmente debajo del fondo marino
- b.** Desarrollo de aparatos experimentales que llenan espacios críticos en el espacio de presión, temperatura, presión de poros y tasa de deformación
- c.** Modelado basado en la asimilación, fusión y análisis de “grandes datos” de la Fase 0
- d.** Desarrollar estrategias de modelado para un diseño de observación y experimental óptimo para ayudar a definir los esfuerzos de observación de mayor impacto en el laboratorio y en el campo
- e.** Nuevo desarrollo de modelado capaz de integrar múltiples tipos de objetos observables de diferente precisión para restringir el modelado multiescala y multifísico, en coordinación con el modelado colaborativo de SZ4D

## 3. Trabajo de reconocimiento

- a.** Realizar investigaciones de reconocimiento de posibles sitios analógicos de subducción coordinados entre geólogos de campo y experimentalistas
- b.** Realizar investigaciones de reconocimiento de historias de deslizamientos geológicos y paleosísmicos para fallas corticales de la placa superior (terrestre y marina)

## 4. Organización y planificación

- a.** Comenzar las conversaciones con los posibles propietarios de cables de fibra óptica marinos sobre el uso potencial para la supervisión y la advertencia

## Fase 2a (restricciones centrales)

### 1. Adquisición de datos

- a.** Restricciones de deslizamiento
  - i.** Establecer una red geodésica central para caracterizar la deformación y el bloqueo a una resolución nominal de 100 km x 50 km a lo largo del impacto y descenso, lo que requiere una red escalonada y espaciada de estaciones GNSS-A. En la región cercana a la fosa, donde la deformación puede ser mucho más localizada, las transiciones entre las zonas acopladas y deslizantes pueden pasar desapercibidas debido al solapamiento espacial
  - ii.** Implementar una red anfibia de estaciones sísmicas y electromagnéticas ampliamente distribuida (~50 km de espaciado) y utilizar imágenes de origen pasivo para permitir la caracterización inicial de terremotos y comportamiento de deslizamientos marinos lentos
  - iii.** Densificar estaciones geodésicas y sísmicas en tierra. Los sitios de GNSS deben tener un espaciado nominal no inferior a la profundidad de la interfaz en esa ubicación (>~40 km cerca de la costa de la mayoría de los entornos). El GNSS cercano a la costa debe diseñarse para la monitorización del tsunami en tiempo real.

La densificación de las redes sísmicas en tierra debe incluir redes instrumentales para mejorar la detección y ubicación de terremotos marinos

- iv. Determinar y adquirir los datos de SAR viables de banda L y C disponibles para interferometría de serie temporal, identificando deformaciones a gran escala, con localizaciones asociadas a procesos superficiales y dislocaciones de la placa superior. Establecer la recopilación continua de datos de SAR de satélites disponibles
- v. Llevar a cabo investigaciones de reconocimiento de sitios paleosísmicos en tierra para historias de deslizamiento de Megathrust de subducción

**b. Restricciones del proceso**

- i. Tomar mediciones de los materiales recuperados del taladrado y la recogida de muestras anteriores, o aquellos que sirven como materiales representativos prioritarios para fallas y rocas de pared
- ii. Recopilar perfiles sísmicos lineales de MT/banda ancha con un espaciado de instrumentos de ~20 km para obtener imágenes de arquitectura de zona de subducción a gran escala y patrones de sismos a gran escala, ubicados con líneas sísmicas de fuente activa.
- iii. Recopilar batimetría de franjas multihaz y adquirir datos de reflexión y refracción sísmica de fuente activa 2D de penetración profunda (con un espaciado máximo de 50 km) así como datos de sonda de flujo de calor
- iv. Recopilar batimetría de alta resolución en las zonas costeras

**2. Síntesis y modelado**

- i. Integrar datos geodésicos, sísmicos y paleosísmicos para mapear el comportamiento de bloqueo y deslizamiento
- ii. Integrar imágenes geofísicas, flujo de calor y geología para determinar la arquitectura y las propiedades de la zona de subducción
- iii. Combinar la arquitectura, la propiedad física y la información de los deslizamientos para restringir los procesos que controlan el bloqueo y el deslizamiento
- iv. Incluir nueva información sobre la estructura y los procesos de la zona de subducción en el modelado de escenarios probabilísticos para estimar el comportamiento de deslizamiento futuro esperado. Utilizar modelos numéricos para explorar la sensibilidad de los datos y proporcionar incertidumbres basadas en los datos de resolución intermedia para guiar la instalación de nuevos sitios en la fase 2

**3. Desarrollo técnico**

- a. Continuar desarrollando capacidades de procesamiento de datos y de ciberinfraestructura junto con organizaciones asociadas para garantizar el uso eficiente de grandes conjuntos de datos recopilados en la fase 1 y la fase 2
- b. Continuar desarrollando y perfeccionando la instrumentación sísmica y geodésica en función de los resultados del despliegue central, en preparación para la fase 2

**4. Organización y planificación**

- a. Desarrollar y coordinar la infraestructura física necesaria para compartir, analizar y archivar muestras geológicas y experimentales
- b. Estaciones de GNSS en tierra mejoradas/reforzadas (cuando estén disponibles) para la longevidad,

comunicaciones y estabilidad del sitio. Crear un plan para el mantenimiento a largo plazo y la recopilación, el archivado y la reducción de datos

- c. Diseñar el despliegue denso sísmico/geodésico anfíbio para la fase 2

## Fase 2b (restricciones específicas de alta resolución)

### 1. De observación

#### a. Restricciones de deslizamiento

- i. Informado por los primeros resultados y modelos, densificar la GNSS-A y la red sísmica/de presión de fondo oceánico para capturar características de alta fidelidad de acoplamiento, sísmico y deslizamiento lento. Esto puede incluir el despliegue de cable de fibra óptica para el análisis de detección acústica distribuida (DAS)
- ii. Continuar con las actualizaciones de GNSS en tierra y redes sísmicas según sea necesario (p. ej., para permitir GNSS de alta velocidad (10 Hz), aumentar las estaciones de GNSS/sísmicas en tierra con un fuerte movimiento para la captura de señales de ruptura de terremotos)
- iii. Instalar observatorios de pozos perforados en tierra para capturar transientes en deslizamiento, hidrogeología o deformación
- iv. Fallos del instrumento en la placa superior con sensores geodésicos, sísmicos y de deformación, según sea necesario
- v. Continuar la recopilación de todos los datos de SAR disponibles
- vi. Llevar a cabo investigaciones paleosísmicas de Megathrust a largo plazo e historias de deslizamientos de fallas corticales

#### b. Restricciones del proceso

- i. Utilizar el estudio de la batimetría multihaz de seguimiento repetido en casos de deslizamiento de fallas poco profundo
- ii. Recopilar imágenes geofísicas de alta resolución en regiones de interesante comportamiento de deslizamiento. Desplegar una densa gama de nodos sísmicos e instrumentos de OBS/OBEM combinados para la obtención de imágenes sísmicas y de MT pasivas de origen activo y pasivo. Realizar un estudio de reflexión sísmica 3D y un estudio electromagnético de fuente controlada densa
- iii. Realizar investigaciones geológicas y experimentales de entradas y análogos de zonas de subducción, incluidas muestras tanto terrestres como marinas

### 2. Interpretación

- a. Analizar todas las observaciones nuevas y existentes sobre el comportamiento y la estructura de la zona de subducción
- b. Los experimentos seguirán informando sobre el modelado y la caracterización geológica para garantizar que se realicen las mediciones necesarias y que se entiendan/apliquen correctamente. Los planes experimentales evolucionarán en respuesta a las observaciones emergentes
- c. Validar y calibrar las herramientas de modelado centradas en datos frente a modelos comunitarios más grandes. Se crearán herramientas de modelado para asimilar las observaciones emergentes de alta resolución (p. ej., análisis rápido a demanda). Se construirán modelos para explorar

qué desarrollos teóricos y restricciones son necesarios para interpretar los flujos de datos de la red de sensores

### Fase 3 (síntesis)

#### 1. Interpretación

- a. Integrar los resultados de todos los componentes para abordar preguntas científicas
- b. Llevar a cabo análisis de datos dirigidos, modelado y experimentos para abordar las preguntas clave que surgen durante la síntesis
- c. Integrar los nuevos resultados del trabajo de SZ4D en los marcos de peligros regionales en colaboración con las partes interesadas locales

#### 2. Organización y planificación

- a. Desarrollar planes para la adopción y el funcionamiento continuo de las redes SZ4D según corresponda



Noviembre de 2022

[www.sz4d.org](http://www.sz4d.org)