

**Universidad Nacional**  
**Sistema de Información Académica**  
**Propuesta de proyecto académico**

SIGESA-SIA

Fecha: 09/03/2025 10:03 AM

**1 Información general básica**

**1.1 Código SIA** 0181-23  
**1.2 Fase** 1  
**1.3 Nombre proyecto antecesor**  
**1.4 Título del proyecto** Monitoreo e investigación en física de Fallas utilizando redes de nodos sísmicos  
**1.5 Vigencia**  
**Fecha inicio** 01/01/2024  
**Fecha fin** 31/12/2026  
**1.6 Instancias y personas ejecutoras**  
**1.6.1 Unidad titular o principal** Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica  
**1.6.2 Jornada total ( horas pagas )** 45

**1.6.3 Persona responsable**

Nombre	Jornada	Tipo de jornada	Instancia académica o afín	Tipo de participante
CHAVES SIBAJA ESTEBAN JOSUE	25	PAGAS DESDE EL PPAA	Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica	FUNCIONARIO

**1.6.4 Otros participantes**

Nombre	Jornada	Tipo de jornada	Instancia académica o afín	Tipo de participante
	20	PAGAS DESDE EL PPAA	Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica	POR DEFINIR - FUNCIONARIO
	15	ADHONOREM	Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica	POR DEFINIR - ESTUDIANTE
CARRERA MORA MARIA PAOLA	10	ADHONOREM	Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica	ESTUDIANTE INTERNO

CHAVARRIA ESQUIVEL NATHALIE YOLIANA	10	ADHONOREM	Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica	FUNCIONARIO
--	----	-----------	---	-------------

## 1.7 Áreas académicas

- Docencia
- Extensión
- Investigación

## 1.8 Tipo de investigación

APLICADA

## 1.9 Mayor componente

Investigación

## 1.10 Abordaje

MULTIDISCIPLINAR

## 1.11 Adscripciones

### 1.11.0 Aporte del proyecto al programa de adscripción

No hay adscripciones

### 1.11.1 Aporte del proyecto a los programas

Código SIA	Título	Estado	Tipo de adscripción	Código presupuestario
0163-25	Observatorio para el Monitoreo de la Dinámica y Vida Oceánica en Costa Rica (Observatorio Oceánico)	PRESENTADA ADMISIBILIDAD	SECUNDARIA	

### Aporte al programa 0163-25 desde el proyecto 0181-23

Colaboración en propuestas futuras e integración de datos

### 1.11.2 Aportes de las actividades continuas al proyecto

Código SIA	Título	Estado	Tipo de adscripción	Código presupuestario
0055-25	EPL - OVSICORI (Earthquake Physics Laboratory - OVSICORI)	FORMULACIÓN	SECUNDARIA	

## Aporte al proyecto desde la actividad continua 0055-25

Los datos recolectados en la actividad continua EPL-OVSICORI servirán también para el análisis e investigación de la física de fallas en cada una de las zonas donde se instalen los nodos sísmicos, en Costa Rica.

### 1.11.3 Aportes de las actividades puntuales al proyecto

No hay actividades puntuales adscritas.

### 1.11.4 Aportes de los eventos al proyecto

No hay eventos adscritos.

## 2 Información técnica

### 2.1 Resumen

La presente formulación corresponde con un proyecto de investigación que pretende extender, durante 3 años, el monitoreo y la comprensión, por medio de la investigación científica, de la física de fallas en Costa Rica, específicamente de los procesos que anteceden y preceden a las dislocaciones dinámicas y/o catastróficas en diversos regímenes tectónicos: desde las zonas de subducción y el fallamiento cortical, hasta los deslizamientos activos, incorporando el uso de redes de nodos sísmicos, o estaciones sismológicas de bajo costo, temporales, y de instalación sencilla y expedita que permitan, en el campo cercano, el monitoreo y la comprensión de los procesos sísmicos y asísmicos en una zona de falla para la evaluación de su potencial sísmico.

### 2.2 Justificación

#### 2.2.1 Vinculación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y sus metas

ODS	Metas
Objetivo 11. Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.	11.5 De aquí a 2030, reducir significativamente el número de muertes causadas por los desastres, incluidos los relacionados con el agua, y de personas afectadas por ellos, y reducir considerablemente las pérdidas económicas directas provocadas por los desastres en comparación con el producto interno bruto mundial, haciendo especial hincapié en la protección de los pobres y las personas en situaciones de vulnerabilidad

#### 2.2.2 Acciones estratégicas del PMPI

Facultad / Centro / Sede	Acción Estratégica
Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar	Implementar acciones que reduzcan la vulnerabilidad ante eventos naturales y antropogénicos

#### 2.2.3 Áreas estratégicas del conocimiento institucionales

Área	Subárea
------	---------

Desarrollo CientíficoTecnológico e Innovación	Alfabetización, Sensibilización y Accesibilidad Científica y Tecnológica
---	--

#### 2.2.4 Áreas temáticas o estratégicas de la (s) instancias (es) participante (es)

Unidad ejecutora	Área temática
Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica	Monitoreo y documentación de actividad volcánica, sísmica y deformación cortical / Contribución al avance científico de la tectónica

#### 2.2.5 Descripción del problema

La presente formulación corresponde con una actividad académica que pretende extender, durante 3 años, el monitoreo y la comprensión, por medio de la investigación científica, de la física de fallas en Costa Rica, específicamente de los procesos que anteceden y preceden a las dislocaciones dinámicas y/o catastróficas en diversos regímenes tectónicos: desde las zonas de subducción y el fallamiento cortical, hasta los deslizamientos activos, incorporando el uso de redes de nodos sísmicos, o estaciones sismológicas de bajo costo, temporales, y de instalación sencilla y expedita que permitan, en el campo cercano, el monitoreo y la comprensión de los procesos sísmicos y asísmicos en una zona de falla para la evaluación de su potencial sísmico.

Utilizando este tipo de instrumentación, complementaria a la red sismográfica y de banda ancha permanente, que opera el OVISCORI-UNA en Costa Rica, se pretende profundizar en la caracterización de la física de fallas, que gobierna la relación espacio-temporal entre los procesos sísmicos (o de tipo “velocity weakening”) y asísmicos (o de tipo “velocity strengthening”), cuya interacción durante cada ciclo sísmico es claramente descrita desde el punto de vista teórico por el modelo constitutivo de “rate and state friction” (Scholz, 1998), y ha sido confirmada experimentalmente tanto en el laboratorio (Karner & Marone, 2000), como en las simulaciones numéricas (Lin & Lapusta, 2018). La evaluación y cuantificación de los diferentes modos de deslizamiento en una zona de falla es absolutamente necesaria para comprender mejor su potencial sísmico (Lin & Lapusta, 2018; Lambert et al., 2021), y su consecuente gestión de riesgo.

A pesar de estar teóricamente demostrado, en la naturaleza esta interacción aún no ha sido comprendida satisfactoriamente. Múltiples trabajos han sugerido la correspondencia espacio-temporal entre la ocurrencia de deslizamiento lento, a lo largo de segmentos de falla con estabilidad en sus propiedades de fricción, y la ocurrencia de enjambres sísmicos (Lohman & McGuire, 2007; McGuire, 2019), temblores (Voss et al., 2018), tremor tectónico (Shelly et al., 2007) y sismos repetidos (Abercrombie, 2014; Chaves et al., 2020; Chen & Lapusta, 2019), generados en regiones cuyas propiedades de fricción son de tipo inestable, como un mecanismo de comunicación entre segmentos de falla con distintas propiedades de fricción. Sin embargo, el “conundrum” actual radica en I) el orden de ocurrencia de los procesos y II) el mecanismo micromecánico que permite el disparo de un modo de deslizamiento con respecto al otro (Dragonì & Tallarico, 1992).

Observaciones recientes han demostrado que en Costa Rica existen múltiples regiones sismo-tectónicas que exhiben esta variación lateral en sus propiedades mecánicas, moduladas parcialmente por la tasa de carga elástica, tipo de material y reología (Chaves & Schwartz, 2016; Xie et al., 2020). Ciertamente, entonces, la valoración del potencial sísmico de estas regiones, así como su impacto en la sociedad civil dependerá del estudio sistemático de este tipo de interacciones mecánicas (Avouac, 2015).

El presente proyecto de investigación, por lo tanto, pretende, de manera novel, afirmar en el OVSICORI-UNA y en la Universidad Nacional un área de investigación relevante para la sismología nacional, que permite además de hacer investigación científica de alto impacto (e.g. Chaves, Schwartz & Abercrombie, 2020), extender y orientar ciertos procesos y metodologías de monitoreo sismológico permanente que el OVSICORI-UNA lleva a cabo en el país.

#### **2.2.6 Antecedentes, estado del arte o línea base**

### **Importancia del estudio y monitoreo de la Física de temblores y Fallas en Costa Rica**

A continuación, se presenta un resumen de un conjunto de observaciones que resaltan y/o justifican la importancia de hacer investigación y monitoreo de procesos geodinámicos relacionados con la física de fallas y de temblores. En estos ejemplos, se describe la relación existente entre los procesos sísmicos y asísmicos, así como la generación de sismicidad en diferentes partes del país por el disparo dinámico de terremotos a distancias telesísmicas. Con esta propuesta de actividad académica se busca que el OVSICORI-UNA avance en la comprensión de este tipo de fenómenos para una mejor estimación del potencial sísmico a lo largo de diferentes regiones en el país, y por consecuencia, para la elaboración de mejores planes de gestión del riesgo y sistemas de alerta temprana.

A pesar de que este tipo de observaciones se han realizado en Costa Rica, podrían mejorarse significativamente con la ayuda de nodos sísmicos en el campo cercano. Una alta densidad instrumental, facilitada por el despliegue de nodos sísmicos con distancias relativas de metros a pocos kilómetros con respecto a la fuente, permitiría registrar energía sísmica de alta frecuencia (en alta resolución) usualmente obscurecida o atenuada en las estaciones permanentes, debido a las grandes distancias de estas con respecto a la fuente, facilitando el análisis detallado de procesos sismotectónicos.

### **Fragilización transitoria (“Transient embrittlement”)**

Una de las observaciones sismológicas modernas más importantes, a nivel nacional e internacional, en la física de fallas, corresponde con la generación en agosto de 2020, del deslizamiento catastrófico en el flanco sureste del volcán Irazú (Chaves et al., 2023). Las estaciones sismológicas HAYA y VICA, ubicadas en el macizo volcánico a pocos metros del evento, registraron el proceso de preparación y rompimiento catastrófico con excelente detalle. Por ejemplo, dos semanas antes de la ocurrencia del deslizamiento un sismo lento, generado en regiones dominadas por propiedades de fricción de tipo “velocity strengthening”, inició con el movimiento precursor de la masa, cargando de manera elástica y repetida pequeñas asperezas que rompieron como “Low Frequency Earthquakes”, LFEs, o sismos de baja frecuencia (Figura 1 y Figura 2). Este tipo de sismicidad es fácilmente diferenciable de la sismicidad “regular”, generadora de altas frecuencias y ha sido comúnmente observada en zonas de subducción y estructuras volcánicas, donde existen las condiciones ideales de presión de poro y variabilidad en las propiedades de fricción (Chamberlain et al., 2014; Gombert et al., 2016).

Tanto la cantidad de familias con LFEs (un total de 10), así como la cantidad acumulada de deslizamiento por familia, incrementó exponencialmente conforme se aceleró la velocidad de propagación del movimiento lento a lo largo del plano de falla en un cambio reológico conocido como “Transient Embrittlement” o fragilización transitoria del material (Chaves et al., 2020; Chen & Lapusta, 2019). Este fenómeno consiste en una transición en las propiedades de fricción, por cambios reológicos y

de fricción, de las asperezas que permearon el plano de falla, pasando de un comportamiento condicionalmente estable a un comportamiento inestable por el incremento en la tasa de carga elástica. Dicho cambio fue generado debido a la aceleración impartida sobre la superficie por el sismo lento.

Previamente, el efecto de la fragilización transitoria había sido observado y documentado en Costa Rica (Chaves et al., 2020) utilizando también sismos repetidos en la zona de subducción por debajo de la Península de Nicoya. Sin embargo, **esta es la primera vez que se documenta a nivel mundial este tipo de procesos en un deslizamiento activo**, logrando explicar la física de preparación y evolución espacio-temporal de un deslizamiento catastrófico. Otros trabajos muestran observaciones similares, sin explicar de manera robusta la física del proceso (e.g. Gomberg, 1995; Poli, 2017).

Tal y como puede verse en la figura 2 y 3, el tiempo de recurrencia entre LFEs se redujo linealmente en el tiempo hasta que 30 minutos antes de la ruptura masiva del deslizamiento los LFEs se fusionaron y/o traslaparon, generando una señal de tremor tectónico que precedió a la caída. La amplitud del tremor es modulada por el incremento en la cantidad de asperezas que sostienen el bloque superior, llevándolo a una estabilidad transitoria de 20 segundos, antes de la caída final. Sin embargo, debido a que el deslizamiento lento continuó activo, se incrementaron los esfuerzos de corte sobre el área efectiva de contacto hasta superar la resistencia de la roca, y finalmente rompiendo catastróficamente. Como resultado, se dió un movimiento de más de 25 millones de metros cúbicos de material hacia el cauce del río sucio.

Esta quizá es la observación sismológica reciente más representativa que permite comprender **la necesidad de estudiar de manera sistemática y robusta la interacción entre procesos sísmicos y asísmicos en nuestro país**, pues sus implicaciones tienen un impacto que afecta positivamente a la sociedad civil, por ejemplo, por medio de la anticipación de un gran deslizamiento en una zona volcánica, la generación de un sistema de alerta temprana y la ejecución en tiempo y forma de planes de gestión del riesgo que puedan salvaguardar la vida y propiedades de la población local.

## **Tremor, Sismos Repetidos y sismicidad lenta en el Pacífico Central de Costa Rica**

El Pacífico central costarricense es una de las regiones sísmicamente más activas de Costa Rica, caracterizada por la subducción de la placa oceánica del Coco por debajo de la microplaca de Panamá. A lo largo de la interfaz de ambas placas en esta zona de subducción, se ha observado una alta variabilidad geométrica y de fricción. Es aquí donde confluyen, por ejemplo, la subducción de montañas submarinas, la ocurrencia de sismos de magnitud intermedia (Pacheco, 2006; Protti et al., 1995), la microsismicidad, los sismos lentos (e.g. Xie et al., 2020), los sismos repetidos (Chaves et al., 2023) y el tremor tectónico (Figura 4). La relocalización de la sismicidad, utilizando métodos de doble diferencia (Waldhauser, 2000), muestra dos cúmulos principales de eventos con orientación casi norte-sur, ocurriendo justo en medio de dos zonas, cuyas propiedades de fricción son predominantemente asísmicas, siendo las responsables de hospedar la mayor cantidad de deslizamiento por sismos lentos (Dixon et al., 2014).

El encajonamiento de la sismicidad justo en medio de las regiones de deslizamiento lento resalta una alta variabilidad lateral en sus propiedades de fricción a lo largo del plano de falla, y muestr además una obvia partición e interacción entre ambos modos de deslizamiento.

Otro proceso que evidencia dicha interacción es la ocurrencia de tremor tectónico, la cual ha estado asociada espaciotemporalmente con la ocurrencia paralela de movimiento asísmico (o bien, sismos lentos). Por ejemplo, horas antes de la ocurrencia del sismo de magnitud  $M_w=6.3$  del 20 de agosto de 2020 frente a Jacó en Garabito de Puntarenas, un tremor tectónico posiblemente disparado por un sismo lento, ocurrió frente a la entrada del Golfo de Nicoya (Figura 5). Se puede interpretar, por lo tanto, que el sismo lento pudo haber jugado un papel importante en el disparo del evento principal, de magnitud  $M_w=6.3$ .

Por otro lado, sismos repetidos con magnitudes entre 0.5 y 4.1 han ocurrido también de manera abundante en la zona, y forman parte de uno de los cúmulos de sismicidad observado en la figura 4. Un total de 23 familias de sismos repetidos se encuentran estrechamente ligadas a la ocurrencia de sismos lentos y afterslips, tal y como se evidencia en la figura 6, donde su tiempo de recurrencia se reduce exponencialmente durante las fases de deslizamiento lento, y/o after slip, generado por los temblores de magnitud intermedia.

El uso y monitoreo permanente de sismos repetidos ha demostrado ser especialmente importante para documentar la ocurrencia de sismos lentos, que escapan de la capacidad de detección de las redes de GNSS debido a que su magnitud está por debajo de la magnitud mínima de detección, pues la ocurrencia de este tipo de deslizamiento podría acelerar el proceso de ruptura de un terremoto de magnitud importante.

### **Disparo dinámico de terremotos**

Múltiples observaciones a nivel internacional han demostrado que el paso de las ondas sísmicas superficiales, generadas por temblores de gran magnitud ( $M_w \geq 7.5$ ), puede disparar micro-sismicidad, tremor tectónico superficial y profundo (Chao & Obara, 2016), y sismicidad lenta (Wallace et al., 2017). La influencia de estos eventos puede darse inclusive a distancias de miles de kilómetros con respecto a su epicentro, siempre y cuando su amplitud supere cierto nivel de microtensión, independientemente de su contenido de frecuencia (Gomberg & Johnson, 2005). Se ha argumentado y observado también, que el disparo dinámico puede ser instantáneo o retrasado, sin comprender completamente la física que gobierna este tipo de comportamiento no lineal (Brodsky & van der Elst, 2014).

Este tipo de interacción dinámica entre sistemas de fallas ha sido registrado en Costa Rica por medio de la instrumentación permanente que el OVSICORI-UNA opera en el país. El caso más reciente corresponde con el disparo de micro-sismicidad frente a la costa de Uvita en Puntarenas producto del paso de las ondas superficiales generadas por el terremoto de Turquía de magnitud 7.8, ocurrido el 6 de febrero de 2023.

Sin embargo, el monitoreo y la investigación de la comunicación entre sistemas de fallas y temblores por medio del campo de esfuerzos dinámico, no ha sido establecido hasta ahora de manera sistemática, por lo que esta propuesta de actividad académica apunta hacia la sistematización y automatización de la búsqueda de sismicidad y tremor inducido por disparo dinámico de terremotos.

Desde el año 2010 la red sismográfica del OVISCORI-UNA ha registrado un total de 25 terremotos telesísmicos (Figura 8), con magnitudes mayores o iguales a 7.5, que han generado en las estaciones locales un estrés dinámico mayor a 1.1 kPa (Figura 9)(Hajaji & Chaves, 2023). Esta observación y su correspondiente documentación no se ha realizado de manera sistemática en el Observatorio, creándose un espacio para estudiar por ejemplo: *¿Cuáles son las regiones del país más susceptibles a hospedar disparo dinámico?, ¿Qué tipo de secuencias (microsismicidad, tremor, etc.) han sido disparadas en Costa Rica con el paso de las ondas superficiales de grandes terremotos? y ¿Puede el disparo dinámico influir en la nucleación de grandes terremotos en Costa Rica?* Esta actividad, pretende en gran medida responder a las preguntas planteadas anteriormente.

## **Redes de nodos sísmicos: su importancia en Costa Rica**

Gran parte de las limitaciones actuales, en la comprensión de los fenómenos descritos anteriormente, yacen en la escala de la cobertura instrumental, tanto sismológica como geodésica, que se utiliza para el monitoreo de muchas de las zonas de falla tectónicamente activas en Costa Rica, restringiendo el estudio comprensivo de los cambios micro-mecánicos de estas regiones a escala local (alta frecuencia), es decir, a una distancia relativa de pocos metros entre los instrumentos de monitoreo y la zona de estudio.

La comprensión física, en espacio y tiempo, de este tipo de procesos y sus diferentes interacciones, así como su impacto en la sociedad costarricense, se robustece con la incorporación de estaciones sismológicas compactas o nodos sísmicos, cuyo espaciamiento puede o debe ser menor a la longitud de onda del proceso en estudio. Tal densificación permite entre otras cosas:

1. Complementar (al menos temporalmente) la cobertura de la red de monitoreo sismológico permanente.
2. Registrar radiación de alta frecuencia, la cual podría utilizarse para:
3. La creación de imágenes tomográficas superficiales (utilizando ondas de cuerpo o ruido sísmico).
4. Para observar sistemas de falla, y cuerpos de baja permeabilidad (mantos acuíferos o fuentes hidrotermales).
5. Para la relocalización de sismicidad por doble diferencia en una muy alta resolución.
6. Para la localización del tremor tectónico.
7. Para la caracterización de procesos de “transient embrittlement” que permitan anticipar deslizamientos activos.
8. Para el estudio del disparo dinámico de temblores, tremor y sismos lentos.
9. Para la caracterización de ruido y secuencias sísmicas inducidas por el ser humano.
10. Caracterizar secuencias en cascada, compuestas por un evento principal y abundante número de réplicas.
11. Delimitar estructuras de falla corticales que no han sido mapeadas en el campo.

Con base en lo anterior, esta actividad propone el uso de los nodos “SmartSolo” o IGUs de tres componentes para el monitoreo y estudio en el campo cercano de los procesos descritos anteriormente. El OVISCORI-UNA cuenta con un total de 20 nodos, los cuales han sido utilizados para registrar actividad sísmica en la provincia de Cartago, correspondiente a la dinámica de la falla Agua Caliente (Figura 10). También, en conjunto con el USGS, el OVISCORI-UNA está participando en una propuesta para comprar 100 nodos más que, en caso de ser aprobada, podrían utilizarse para estudiar una o varias zonas regiones del país de manera simultánea.



Un ejemplo claro de la importancia de contar con este tipo de instrumentación, para la caracterización completa de secuencias sísmicas y la física de fallas corresponde con el reciente sismo de magnitud 5.1 ocurrido el 18 de febrero de 2023, 3 km hacia el oeste de Vara Blanca, en Alajuela, muy cerca de la falla el Ángel, que originó el terremoto de magnitud 6.2 del 8 de enero de 2009 (Figura 11). La secuencia de febrero 2023 se generó en un sistema de fallas lateral a la Falla el Ángel que aún no había sido mapeado en el Campo.

Utilizando la red de IGUs, en el campo cercano, es posible dentro de otras cosas (como las mencionadas arriba) registrar con excelente detalle la microsismicidad en el campo cercano, para caracterizar con mejor precisión, la geometría y extensión (horizontal y vertical) del sistema de fallas causante.

## Referencias

- Abercrombie, R. E. (2014). Stress drops of repeating earthquakes on the San Andreas Fault at Parkfield: Stress drops of Repeating Earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 41(24), 8784–8791. <https://doi.org/10.1002/2014GL062079>
- 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(1), 233–271. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060614-105302>
- Brodsky, E. E., & van der Elst, N. J. (2014). The Uses of Dynamic Earthquake Triggering. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 42(1), 317–339. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060313-054648>
- Chamberlain, C. J., Shelly, D. R., Townend, J., & Stern, T. A. (2014). Low-frequency earthquakes reveal punctuated slow slip on the deep extent of the Alpine Fault, New Zealand. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(7), 2984–2999. <https://doi.org/10.1002/2014GC005436>
- Chao, K., & Obara, K. (2016). Triggered tectonic tremor in various types of fault systems of Japan following the 2012  $M_w$  8.6 Sumatra earthquake: TRIGGERED TREMOR IN JAPAN. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(1), 170–187. <https://doi.org/10.1002/2015JB012566>
- Chaves, E. J., & Schwartz, S. Y. (2016). Monitoring transient changes within overpressured regions of subduction zones using ambient seismic noise. *Science Advances*, 2(1), e1501289. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501289>
- Chaves, E. J., Schwartz, S. Y., & Abercrombie, R. E. (2020). Repeating earthquakes record fault weakening and healing in areas of megathrust postseismic slip. *Science Advances*, 6(32), eaaz9317. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz9317>
- Chen, T., & Lapusta, N. (2019). On behaviour and scaling of small repeating earthquakes in rate and state fault models. *Geophysical Journal International*, 218(3), 2001–2018. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz270>
- Dixon, T. H., Jiang, Y., Malservisi, R., McCaffrey, R., Voss, N., Protti, M., & Gonzalez, V. (2014). Earthquake and tsunami forecasts: Relation of slow slip events to subsequent earthquake rupture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(48), 17039–17044. <https://doi.org/10.1073/pnas.1412299111>
- Dragoni, M., & Tallarico, A. (1992). Interaction between seismic and aseismic slip along a transcurrent plate boundary: A model for seismic sequences. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 72(1–2), 49–57. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(92\)90048-Z](https://doi.org/10.1016/0031-9201(92)90048-Z)

- Gomberg, J. (1995). *Landslide faults and tectonic faults, analogs?: The Slumgullion earthow, Colorado*. 4.
- Gomberg, J., Agnew, D. C., & Schwartz, S. Y. (2016). Alternative source models of very low frequency events: VERY LOW FREQUENCY EVENT SOURCE MODELS. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(9), 6722–6740. <https://doi.org/10.1002/2016JB013001>
- Gomberg, J., & Johnson, P. (2005). Dynamic triggering of earthquakes. *Nature*, 437(7060), 830–830. <https://doi.org/10.1038/437830a>
- Karner, S. L., & Marone, C. (2000). Effects of loading rate and normal stress on stress drop and stick-slip recurrence interval. In J. B. Rundle, D. L. Turcotte, & W. Klein (Eds.), *Geophysical Monograph Series* (Vol. 120, pp. 187–198). American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/GM120p0187>
- Lambert, V., Lapusta, N., & Perry, S. (2021). Propagation of large earthquakes as self-healing pulses or mild cracks. *Nature*, 591(7849), 252–258. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03248-1>
- Lin, Y., & Lapusta, N. (2018). Microseismicity Simulated on AsperityLike Fault Patches: On Scaling of Seismic Moment With Duration and Seismological Estimates of Stress Drops. *Geophysical Research Letters*, 45(16), 8145–8155. <https://doi.org/10.1029/2018GL078650>
- Lohman, R. B., & McGuire, J. J. (2007). Earthquake swarms driven by aseismic creep in the Salton Trough, California: OBSIDIAN BUTTES SWARM. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B4). <https://doi.org/10.1029/2006JB004596>
- McGuire, J. J. (2019). The geology of earthquake swarms. *Nature Geoscience*, 12(2), 82–83. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0302-1>
- Pacheco, J. Fco. (2006). The Mw 6.4 Damas, Costa Rica, Earthquake of 20 November 2004: Aftershocks and Slip Distribution. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(4A), 1332–1343. <https://doi.org/10.1785/0120050261>
- Poli, P. (2017). Creep and slip: Seismic precursors to the Nuugaatsiaq landslide (Greenland): Seismic Precursors to a Landslide. *Geophysical Research Letters*, 44(17), 8832–8836. <https://doi.org/10.1002/2017GL075039>
- Protti, M., McNally, K., Pacheco, J., González, V., Montero, C., Segura, J., Brenes, J., Barboza, V., Malavassi, E., Güendel, F., Simila, G., Rojas, D., Velasco, A., Mata, A., & Schillinger, W. (1995). The March 25, 1990 ( $M_w = 7.0$ ,  $M_L = 6.8$ ), earthquake at the entrance of the Nicoya Gulf, Costa Rica: Its prior activity, foreshocks, aftershocks, and triggered seismicity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B10), 20345–20358. <https://doi.org/10.1029/94JB03099>
- Scholz, C. H. (1998). Earthquakes and friction laws. *Nature*, 391(6662), 37–42. <https://doi.org/10.1038/34097>
- Shelly, D. R., Beroza, G. C., & Ide, S. (2007). Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms. *Nature*, 446(7133), 305–307. <https://doi.org/10.1038/nature05666>
- Voss, N., Dixon, T. H., Liu, Z., Malservisi, R., Protti, M., & Schwartz, S. (2018). Do slow slip events trigger large and great megathrust earthquakes? *Science Advances*, 4(10), eaat8472. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat8472>
- Waldhauser, F. (2000). A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(6), 1353–1368. <https://doi.org/10.1785/0120000006>

Wallace, L. M., 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(10), 765–770. <https://doi.org/10.1038/ngeo3021>

Xie, S., Dixon, T. H., Malservisi, R., Jiang, Y., Protti, M., & Muller, C. (2020). Slow Slip and Inter transient Locking on the Nicoya Megathrust in the Late and Early Stages of an Earthquake Cycle. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(11). <https://doi.org/10.1029/2020JB020503>

2.3 Objetivos

2.3.1 Objetivo general

Analizar los procesos que anteceden y preceden a rupturas catastróficas en zonas de subducción, fallamiento cortical, deslizamientos activos y disparo dinámico con el propósito de consolidar y avanzar en el estudio de la física de fallas y temblores en Costa Rica por medio de la investigación y el monitoreo sismológico utilizando redes de nodos sísmicos en el campo cercano.

2.3.2 Objetivos específicos y actividades

**Objetivo** Desplegar prontamente redes de nodos sísmicos para monitorear y caracterizar secuencias de **específico** tipo enjambres, cascada, deslizamientos activos y tremor tectónico, cuando estos ocurran en cualquier parte del país, complementando la red de monitoreo permanente de Banda Ancha que el OVSICORI opera en Costa Rica.

Descripción de actividades	Responsable	Vigencia
Plenear y movilizar la red de nodos sísmicos desde el OVSICORI-UNA hasta el campo con el propósito de dar respuesta a secuencias sísmicas o deslizamientos de importancia en Costa Rica. Desde el inicio hasta el fin del presente proyecto de investigación.	113280150 - CHAVES SIBAJA ESTEBAN JOSUE 114200602 - CHAVARRIA ESQUIVEL NATHALIE YOLIANA 116140104 - CARRERA MORA MARIA PAOLA POR DEFINIR - ESTUDIANTE - Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica	01/01/2024 - 31/12/2026

**Objetivo** Generar un protocolo y el software necesario para la incorporación de datos sismológicos, **específico** adquiridos mediante los nodos sísmicos, hacia la base de datos del OVSICORI-UNA en Seiscomp y Antelope

Descripción de actividades	Responsable	Vigencia
Desarrollo de un protocolo de instalación y recolección de nodos, así como la escritura de software	113280150 - CHAVES SIBAJA ESTEBAN JOSUE	01/01/2024 - 31/12/2024

**Objetivo** Aplicar metodologías geofísicas para el análisis de datos sismológicos de acuerdo con el **específico** evento o proceso en estudio para el cual se desplegó la red de nodos sísmicos.

Descripción de actividades	Responsable	Vigencia
para cada una de las redes de nodos desplegadas en el campo, se aplicara al menos uno de los siguientes metodos: 1. H/V spectral ratios para inferir propiedades del medio local. 2.		

Power Spectral Densities (PDFs) para conocer la salud del equipo y el nivel de ruido del sitio. 3. Correlaciones cruzadas y autocorrelaciones de ruido sísmico para: 3.1. Conocer cambios estructurales y crear imágenes de la corteza superior. 3.2. Monitorear niveles freáticos y movimiento de fluidos (cuando sea posible). 3.3. Monitorear cambios en el ruido antropogénico. 4. identificación de fases de arribo para la Onda P y Onda S utilizando métodos modernos de computación avanzada. 5. Localizar la actividad sísmica registrada por la red de nodos sísmicos utilizando el Pipeline OKSP desarrollado en conjunto con el CNCA del CENAT. 6. Cálculos de Tensor de Momento sísmico.	113280150 - CHAVES SIBAJA ESTEBAN JOSUE 114200602 - CHAVARRIA ESQUIVEL NATHALIE YOLIANA 116140104 - CARRERA MORA MARIA PAOLA POR DEFINIR - ESTUDIANTE - Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica POR DEFINIR - FUNCIONARIO - Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica	01/01/2024 - 31/12/2026
---	---	-------------------------

2.3.3 Objetivos específicos e indicadores

**Objetivo** Desplegar prontamente redes de nodos sísmicos para monitorear y caracterizar secuencias de **específico** tipo enjambres, cascada, deslizamientos activos y tremor tectónico, cuando estos ocurran en cualquier parte del país, complementando la red de monitoreo permanente de Banda Ancha que el OVSICORI opera en Costa Rica.

Descripción de indicador (es) de logro por objetivo	Fecha prevista de entrega
9 redes de nodos sísmicos anuales en cualquier parte de Costa Rica	31/12/2026

**Objetivo** Generar un protocolo y el software necesario para la incorporación de datos sismológicos, **específico** adquiridos mediante los nodos sísmicos, hacia la base de datos del OVSICORI-UNA en Seiscomp y Antelope

Descripción de indicador (es) de logro por objetivo	Fecha prevista de entrega
1 Protocolo de uso para los nodos sísmicos 1 Software para la incorporación de datos sísmicos en la base de datos del OVSICORI-UNA	31/12/2024

**Objetivo** Aplicar metodologías geofísicas para el análisis de datos sismológicos de acuerdo con el **específico** evento o proceso en estudio para el cual se desplegó la red de nodos sísmicos.

Descripción de indicador (es) de logro por objetivo	Fecha prevista de entrega
Para cada despligue o red de nodos instalada en el campo, se entregará un informe técnico que mostrará la distribución espacial de la red de nodos,	

así como el análisis de datos utilizando uno o varios de los métodos descritos en la sección de actividades, con el propósito de comprender la sismo-tectónica y física del proceso en estudio.	31/12/2026
---	------------

## 2.4 Productos esperados

Tipo de producto	Descripción	Cantidad	Fecha prevista de entrega
SOFTWARE	Para comunicar nodos con bases de datos de Antelope y Seiscomp	1	31/12/2024
D A T O S GEOESPACIALES	Catalogos sísmicos de: 1. Sismos repetidos 2. Tremor tectónico 3. Sismos disparados dinámicamente.	3	31/12/2026
OTRO	Artículos científicos en revistas internacionales indexadas.	2	31/12/2026
SOFTWARE	enveloc para localización de tremor tectónico en Costa Rica.	1	31/12/2026
PRESENTACIÓN DE LA CONFERENCIA	Al menos 3: 1 por año.	3	31/12/2026

## 2.5 Metodología

### 2.5.1 Descripción

#### Generalidades

Con la implementación de los nodos sísmicos, se pretende dar respuesta pronta a las actividades sísmicas importantes como por ejemplo: enjambres sísmicos, secuencias en cascada, deslizamiento de tierra y el monitoreo de sismos repetidos y tremor tectónico ante la ocurrencia de sismos lentos en las zonas de subducción. ***Debe entenderse que el uso de nodos se hará de manera reactiva ante la ocurrencia de estos procesos***, una vez identificados con la red sísmica de banda de ancha que el OVSICORI-UNA opera en tiempo real. De manera que, la instalación de este tipo de redes no tiene un tiempo ni espacio definido a priori.

En Costa Rica múltiples regiones exhiben secuencias especiales con frecuencia y de manera aleatoria. Este proyecto tratará de cubrir la mayor cantidad de eventos posibles.

#### Redes de nodos sísmicos

Una vez colectados los datos de los nodos sísmicos, se procederá con la ejecución de un protocolo de pre-procesamiento y procesamiento de datos sismológicos para asegurar la trazabilidad y calidad de los datos

colectados, así como también, la incoportación de la data en los servidores del OVSICORI-UNA que interactúan con los programas de Antelope y Seiscomp. De esta manera todas las personas interesadas dentro del Observatorio también tendrán acceso a los datos.

Posteriormente, se procederá con el análisis de los datos sísmicos utilizando diversas metodologías sismológicas y/o geofísicas, tal y como se describe en los objetivos específicos y sus actividades, además de la implementación de métodos modernos de computación avanzada para el análisis de bigdata. El tipo de análisis dependerá de la zona de estudio y del objetivo del trabajo y despliegue de la red de nodos en el campo. Para cada red de nodos sísmicos, se procederá con la elaboración de un informe científico-técnico con la descripción de la red y con el análisis de datos empleado para comprender el proceso en estudio.

Las metodologías que se aplicarán para el análisis de datos han sido probadas por Chaves y otros en el varios artículos científicos publicados anteriormente (Ver SIA 0014-20, y las referencias descritas en el marco teórico de este proyecto de investigación).

El lector podrá referirse a los objetivos específicos y sus actividades para una mayor claridad sobre las metodologías individuales de cada una de las áreas de estudio que abarca el presente proyecto de investigación.

### **2.5.2 Plan de Gestión de Datos**

Todos los datos y catálogos serán gestionados en el servidor del OVSICORI-UNA así como en la página web del Observatorio

### **2.6 Mecanismos de rendición de cuentas y estrategia de comunicación**

Presentación de informes de avances anuales ante el consejo de Unidad del OVSICORI-UNA.

Diseminación de Publicaciones al personal del OVISCORI-UNA.

### **2.7 Matriz de riesgos**

<b>Descripción del riesgo</b>	<b>Medida de mitigación</b>
Estado del tiempo (o clima) para poder desplazarse a los sitios de estudio	Esperar.
Fallo técnico del equipo (nodos) y/o sistema de carga de batería y descarga de datos	En caso del fallo técnico de algún instrumento, incluyendo los nodos o bien el rack para la carga de batería y descarga de datos, se acudirá al uso de lagarantía para su reemplazo. En caso de que esta no aplique, se acudirá a la asamblea de unidad del OVISCORI-UNA para plantear la necesidad de reemplazar la Unidad, utilizando los fondos económicos disponibles de la ley de emergencias. De esta manera se asegura la continuidad del proyecto.

Perdida de instrumentos (nodos) por robo.	Se procederá con la escogencia óptima de los sitios para instalar este tipo de instrumentación, como por ejemplo, propiedades privadas, de manera que esten en lugares seguros, y no esten expuestos. De ocurrir algo, como un robo o pérdida, se procederá con la denuncia respectiva a la delegación policial correspondiente y/o Organismo de Investigación Judicial. Para asegurar la continuidad del proyecto, se presentará por escrito un plan de acción ante la asamblea de Unidad para poder utilizar los fondos económicos de la ley de emergencias para la compra del instrumentento robado.
---	---

### 3 Presupuesto

**Unidad ejecutora** Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica

**Fondo** Ley 5909 FEES del Periodo

**Moneda** COLONES

Cuenta	2024	2025	2026	2027	Total
Viáticos dentro del País	300,000.00	300,000.00	300,000.00		900,000.00
<b>Total por año</b>	300,000.00	300,000.00	300,000.00		900,000.00

**Unidad ejecutora** Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica

**Fondo** Ley 8488 Emergencias y Prevención de Riesgos Superavit

**Moneda** DÓLARES

Cuenta	2024	2025	2026	2027	Total
Equipo de Computación	20,000.00		5,500.00		25,500.00
<b>Total por año</b>	20,000.00		5,500.00		25,500.00

#### 3.1 Formulación presupuestaria

#### 3.2 Justificación del presupuesto

1. Es necesario contar con viáticos para el traslado y manutención en el interior del país, durante episodios de crisis sísmicas, que ameriten el despliegue de nodos sísmicos y la atención de la emergencia.
2. Se requiere de la compra de un rack para la carga de baterías y descarga de datos de los nodos sísmicos.
3. Se quiere salir del país para capacitarse y formar parte de los principales congresos o reuniones en geociencias entre el 2024 y 2026.

### 4 Información para indicadores y afines

#### 4.1 Palabras clave

- DESLIZAMIENTO ASÍSMICO

- FISICA DE FALLAS
- NODOS SÍSMICOS
- PROPIEDADES DE FRICCIÓN
- SISMOS REPETIDOS

## 4.2 Grupos meta

Primer nivel	Último nivel
SEGÚN SITUACIÓN DE VULNERABILIDAD	OTRAS

## 4.3 Sector de aplicación u objetivo socioeconómico

Exploración y explotación del medio terrestre

## 4.4 Áreas de la ciencia

Área	Subárea
Ciencias naturales	Ciencias de la tierra y ciencias ambientales relacionadas

## 4.5 Área de influencia del proyecto

Región	País	Región socioeconómica	Provincia	Cantón	Distrito	Localidad
Nacional	COSTA RICA	Todo el País				Aplica a cualquier región del país donde se generen réplicas, enjambres, deslizamientos de tierra, sismos repetidos, etc.

Latitud	Longitud
-85.0	10.0

## 5 Observaciones

No se han descrito observaciones para el proyecto.

## 6 Bibliografía

Abercrombie, R. E. (2014). Stress drops of repeating earthquakes on the San Andreas Fault at Parkfield: Stress drops of Repeating Earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 41(24), 8784–8791. <https://doi.org/10.1002/2014GL062079>

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(1), 233–271. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060614-105302>



- Brodsky, E. E., & van der Elst, N. J. (2014). The Uses of Dynamic Earthquake Triggering. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 42(1), 317–339. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060313-054648>
- Chamberlain, C. J., Shelly, D. R., Townend, J., & Stern, T. A. (2014). Low-frequency earthquakes reveal punctuated slow slip on the deep extent of the Alpine Fault, New Zealand. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(7), 2984–2999. <https://doi.org/10.1002/2014GC005436>
- Chao, K., & Obara, K. (2016). Triggered tectonic tremor in various types of fault systems of Japan following the 2012  $M_w$  8.6 Sumatra earthquake: TRIGGERED TREMOR IN JAPAN. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(1), 170–187. <https://doi.org/10.1002/2015JB012566>
- Chaves, E. J., & Schwartz, S. Y. (2016). Monitoring transient changes within overpressured regions of subduction zones using ambient seismic noise. *Science Advances*, 2(1), e1501289. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501289>
- Chaves, E. J., Schwartz, S. Y., & Abercrombie, R. E. (2020). Repeating earthquakes record fault weakening and healing in areas of megathrust postseismic slip. *Science Advances*, 6(32), eaaz9317. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz9317>
- Chen, T., & Lapusta, N. (2019). On behaviour and scaling of small repeating earthquakes in rate and state fault models. *Geophysical Journal International*, 218(3), 2001–2018. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz270>
- Dixon, T. H., Jiang, Y., Malservisi, R., McCaffrey, R., Voss, N., Protti, M., & Gonzalez, V. (2014). Earthquake and tsunami forecasts: Relation of slow slip events to subsequent earthquake rupture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(48), 17039–17044. <https://doi.org/10.1073/pnas.1412299111>
- Dragoni, M., & Tallarico, A. (1992). Interaction between seismic and aseismic slip along a transcurrent plate boundary: A model for seismic sequences. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 72(1–2), 49–57. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(92\)90048-Z](https://doi.org/10.1016/0031-9201(92)90048-Z)
- Gomberg, J. (1995). *Landslide faults and tectonic faults, analogs?: The Slumgullion earthow, Colorado*. 4.
- Gomberg, J., Agnew, D. C., & Schwartz, S. Y. (2016). Alternative source models of very low frequency events: VERY LOW FREQUENCY EVENT SOURCE MODELS. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(9), 6722–6740. <https://doi.org/10.1002/2016JB013001>
- Gomberg, J., & Johnson, P. (2005). Dynamic triggering of earthquakes. *Nature*, 437(7060), 830–830. <https://doi.org/10.1038/437830a>
- Karner, S. L., & Marone, C. (2000). Effects of loading rate and normal stress on stress drop and stick-slip recurrence interval. In J. B. Rundle, D. L. Turcotte, & W. Klein (Eds.), *Geophysical Monograph Series* (Vol. 120, pp. 187–198). American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/GM120p0187>
- Lambert, V., Lapusta, N., & Perry, S. (2021). Propagation of large earthquakes as self-healing pulses or mild cracks. *Nature*, 591(7849), 252–258. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03248-1>
- Lin, Y., & Lapusta, N. (2018). Microseismicity Simulated on AsperityLike Fault Patches: On Scaling of Seismic Moment With Duration and Seismological Estimates of Stress Drops. *Geophysical Research Letters*, 45(16), 8145–8155. <https://doi.org/10.1029/2018GL078650>

Lohman, R. B., & McGuire, J. J. (2007). Earthquake swarms driven by aseismic creep in the Salton Trough, California: OBSIDIAN BUTTES SWARM. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B4). <https://doi.org/10.1029/2006JB004596>

McGuire, J. J. (2019). The geology of earthquake swarms. *Nature Geoscience*, 12(2), 82–83. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0302-1>

Pacheco, J. Fco. (2006). The Mw 6.4 Damas, Costa Rica, Earthquake of 20 November 2004: Aftershocks and Slip Distribution. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(4A), 1332–1343. <https://doi.org/10.1785/0120050261>

Poli, P. (2017). Creep and slip: Seismic precursors to the Nuugaatsiaq landslide (Greenland): Seismic Precursors to a Landslide. *Geophysical Research Letters*, 44(17), 8832–8836. <https://doi.org/10.1002/2017GL075039>

Protti, M., McNally, K., Pacheco, J., González, V., Montero, C., Segura, J., Brenes, J., Barboza, V., Malavassi, E., Güendel, F., Simila, G., Rojas, D., Velasco, A., Mata, A., & Schillinger, W. (1995). The March 25, 1990 ( $M_w = 7.0$ ,  $M_L = 6.8$ ), earthquake at the entrance of the Nicoya Gulf, Costa Rica: Its prior activity, foreshocks, aftershocks, and triggered seismicity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B10), 20345–20358. <https://doi.org/10.1029/94JB03099>

Scholz, C. H. (1998). Earthquakes and friction laws. *Nature*, 391(6662), 37–42. <https://doi.org/10.1038/34097>

Shelly, D. R., Beroza, G. C., & Ide, S. (2007). Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms. *Nature*, 446(7133), 305–307. <https://doi.org/10.1038/nature05666>

Voss, N., Dixon, T. H., Liu, Z., Malservisi, R., Protti, M., & Schwartz, S. (2018). Do slow slip events trigger large and great megathrust earthquakes? *Science Advances*, 4(10), eaat8472. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat8472>

Waldhauser, F. (2000). A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(6), 1353–1368. <https://doi.org/10.1785/0120000006>

Wallace, L. M., 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(10), 765–770. <https://doi.org/10.1038/ngeo3021>

Xie, S., Dixon, T. H., Malservisi, R., Jiang, Y., Protti, M., & Muller, C. (2020). Slow Slip and Inter transient Locking on the Nicoya Megathrust in the Late and Early Stages of an Earthquake Cycle. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(11). <https://doi.org/10.1029/2020JB020503>