

UTILIDAD DE LA TCMD EN LA VALORACIÓN DE MODELOS PREDICTIVOS DE ERUPCIONES VOLCÁNICAS CATASTRÓFICAS

Ana Alonso Torres¹, Félix Guerra Gutiérrez²,
Marta Rincón Ramos³, Álvaro Márquez
González³, Raquel Herrera Espada³, Jaime
Fernández Cuadrado⁴

- 1) Hospital Universitario Rey Juan Carlos, Móstoles
- 2) Hospital General de Villalba
- 3) Área de Geología Universidad Rey Juan Carlos, Móstoles
- 4) Hospital Universitario Fundación Jiménez Díaz, Madrid

Introducción

- Para comprender mejor los fenómenos de erupción volcánica, los geólogos tradicionalmente se han basado en la **modelización análoga**, es decir el estudio de maquetas a escala. Estos modelos generalmente ofrecen información **estática** y de **superficie**.
- Presentamos un experimento multidisciplinar en la que los **Radiólogos** del HURJC hemos colaborado con el **Área de Geología** de la Universidad aplicando la Tomografía Computarizada Multidetector, **TCMD**, para el estudio de modelos predictivos de erupciones volcánicas, permitiéndonos realizar un estudio **dinámico, multiplanar** y de **superficie**.
- Presentamos el abordaje del experimento desde el **punto de vista del radiólogo** en el que hemos tratado de emplear nuestros conocimientos para optimizar el diseño del experimento y análisis de los datos con la peculiaridad de tratarse del estudio de un objeto sujeto a cambios temporales aunque inorgánico y lejos de la esfera de nuestra práctica habitual.

Preámbulo

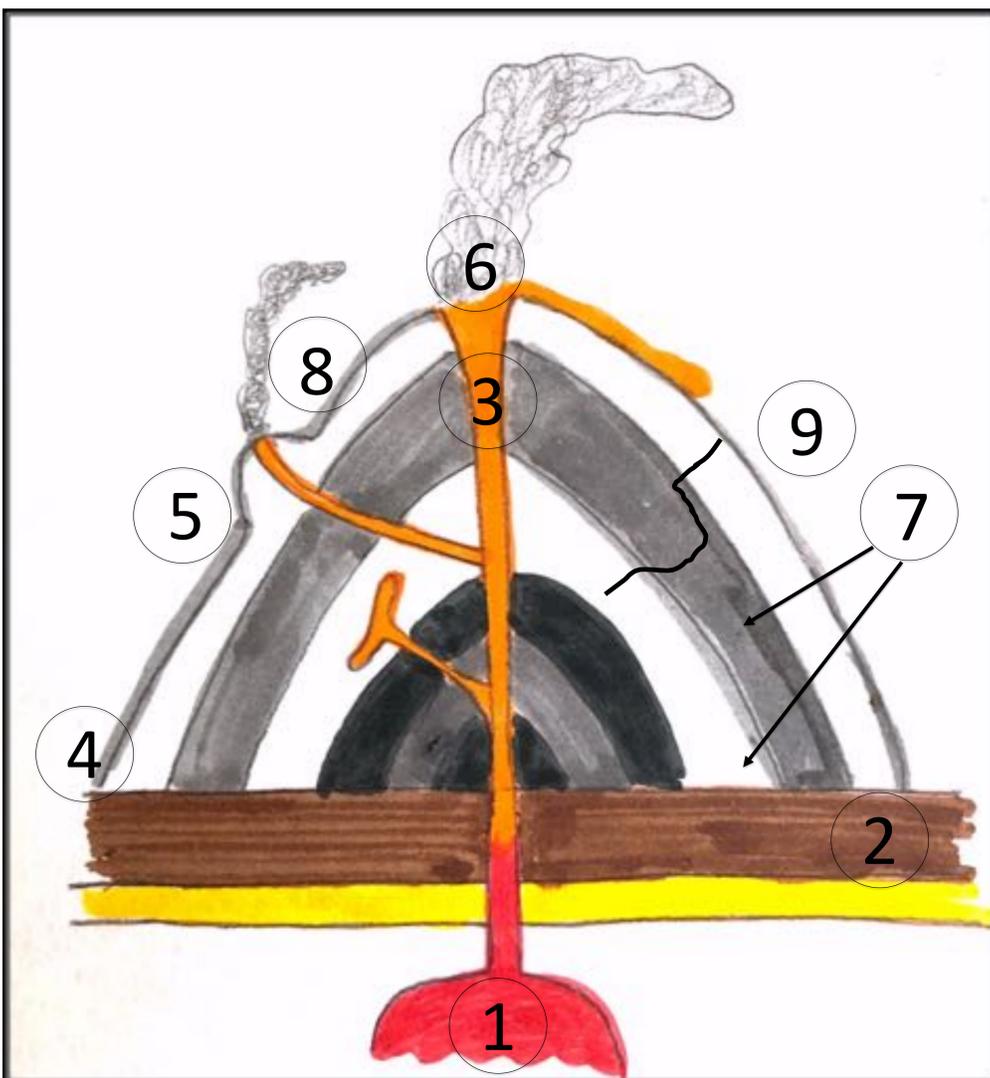
“Fundamentos de Vulcanología”

o

“Todo lo que un Radiólogo Curioso
tiene que saber antes de continuar”

Glosario y Definiciones

- **Volcán:** Lugar, generalmente sobreelevado, donde se establece comunicación directa entre el manto y la superficie terrestre a través de la corteza y por donde se expulsa **lava**, de fluidez variable, **piroclastos** (rocas sólidas a alta temperatura), **gases** y **ceniza**.
- Partes de un volcán:



- 1- Cámara Magmática
- 2- Corteza
- 3- Chimenea
- 4- Base
- 5- Flanco
- 6- Cráter
- 7- Superposición de capas de ceniza y lava
- 8- Cono secundario
- 9- Falla o Fractura

Fig 1. Esquema de las principales partes de un volcán

Glosario y Definiciones

- **Tipos de Volcanes según Frecuencia Eruptiva:**
 - **Activo**: Puede entrar en erupción de forma inminente. Última erupción en tiempos históricos. Mantiene signos de actividad (seísmos, fumarolas...)
 - **Periodo Eruptivo**: Periodo en el que el material interno aflora a la superficie. Puede durar horas o días y puede contar con fases eruptivas sucesivas
 - **Latente**: Volcán activo en fase no eruptiva
 - **Inactivo**: Última erupción muy antigua aunque puede presentar algún signo de actividad
 - **Extinto**: Última erupción hace más de 10.000 años.

Glosario y Definiciones

- **Tipos de Volcanes según Morfología y Composición:**
 - **Domo de Lava:** La lava se acumula sobre el cráter formando un montículo
 - **Escudo:** volcanes mucho más anchos que altos
 - **Fisura:** Chimenea volcánica lineal
 - **Cono de Ceniza:** Volcán clásico en forma de cono con laderas abruptas
 - **Estratovolcán:** Clásico y voluminoso volcán formado por aposición de ceniza y lava. Muestra laderas progresivamente más abruptas cerca del cráter.



Fig 2. Volcán en escudo
Mauna Loa



Fig 3. Estratovolcán
Mayon

Glosario y Definiciones

- **Tipos de Erupción Volcánica, de menos a más catastrófica:**
 - **Hawaiana**: Salida de lava fluida
 - **Estromboliana**: alternancia de expulsión de material sólido y fluido
 - **Vulcaniana**: se desprende gran cantidad de gas y lava poco fluida
 - **Vesubiana**: Se desprende gas a gran presión y material sólido (piroclastos)
 - **Pliniana**: Erupción de gran violencia donde se desprende gas a gran presión en forma de columna vertical que puede alcanzar la estratosfera. Se acompaña de explosiones y emisión de piroclastos. Suele acompañarse de hundimiento parcial del volcán del cráter.
 - **Erupción tipo Bezymianny**: Erupción lateral con colapso lateral, seguida de erupción vertical pliniana. Gran potencial destructivo.

Nuestro Modelo: Mount Saint Helens

- **Estratovolcán** en el estado de Washington, EEUU.
- **Erupción Pliniana tipo Bezymianny** en 1980 tras 123 años de latencia
- **Periodo eruptivo** desde el 23 de marzo 1980, con abultamiento progresivo lateral que abocó el 18 de mayo en erupción explosiva con derrumbe y destrucción de la ladera norte dando lugar a la mayor avalancha de escombros conocida.

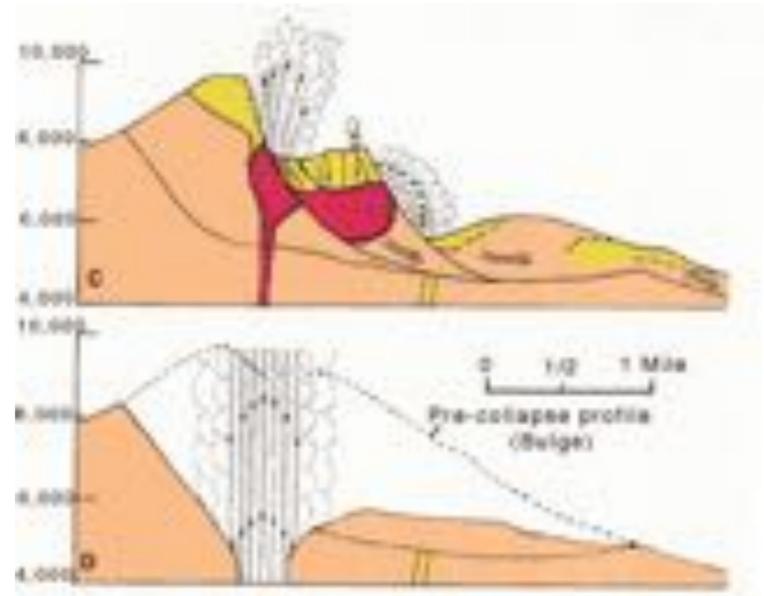
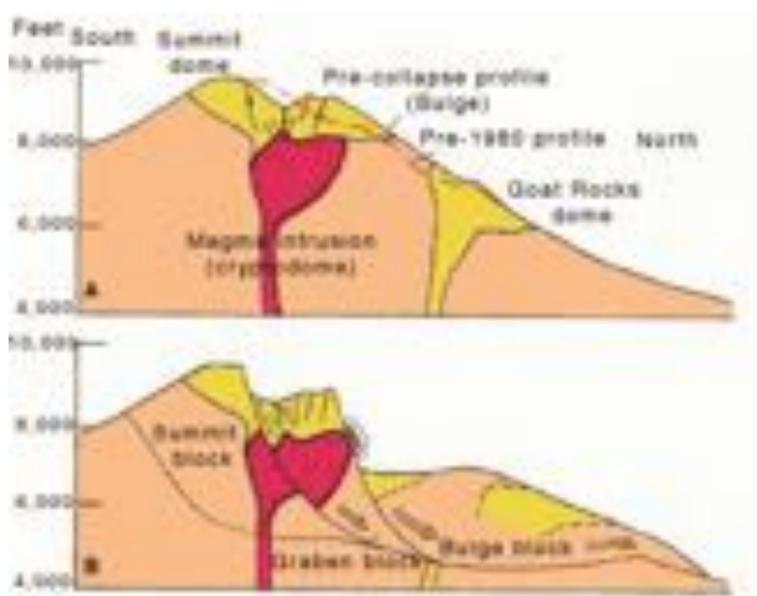


Fig 4. Esquema de la evolución temporal de la erupción



Fig 5. Antes de la Erupción



Fig 6. Tras la Erupción

Objetivo

- Las erupciones volcánicas catastróficas pueden ser verticales o laterales y, en ocasiones pueden asociarse a fenómenos de colapso, siendo muy difícil predecir estos patrones o prever sus consecuencias.
- Para abordar este problema, realizamos el estudio de modelos análogos mediante TCMD con el fin de monitorizar la **intrusión magmática, formación de fallas y deformación de la superficie.**

Material

- **El Modelo Análogo:** Cono de 11 cm de arena y yeso realizado a escala geométrica, dinámica y cinemática con respecto al estratovolcán Mount St Helens. Es decir el modelo tiene características similares a las de la naturaleza y se comportará morfológicamente y en el tiempo, a escala con respecto al original.
- **Análogo magmático:** Sirope “Golden Syrup” con viscosidad característica óptima. Colocación de Columna en altura para asegurar **flujos 1-3 cm³/min**. Simula la intrusión de magma al volcán.
- **Dispositivo:** El cono se dispone en el interior de cajón translucido que permite la introducción vertical del sirope a la base del volcán a través de un tubo. Es posible controlar la temperatura, flujo y presión de inyección del sirope.

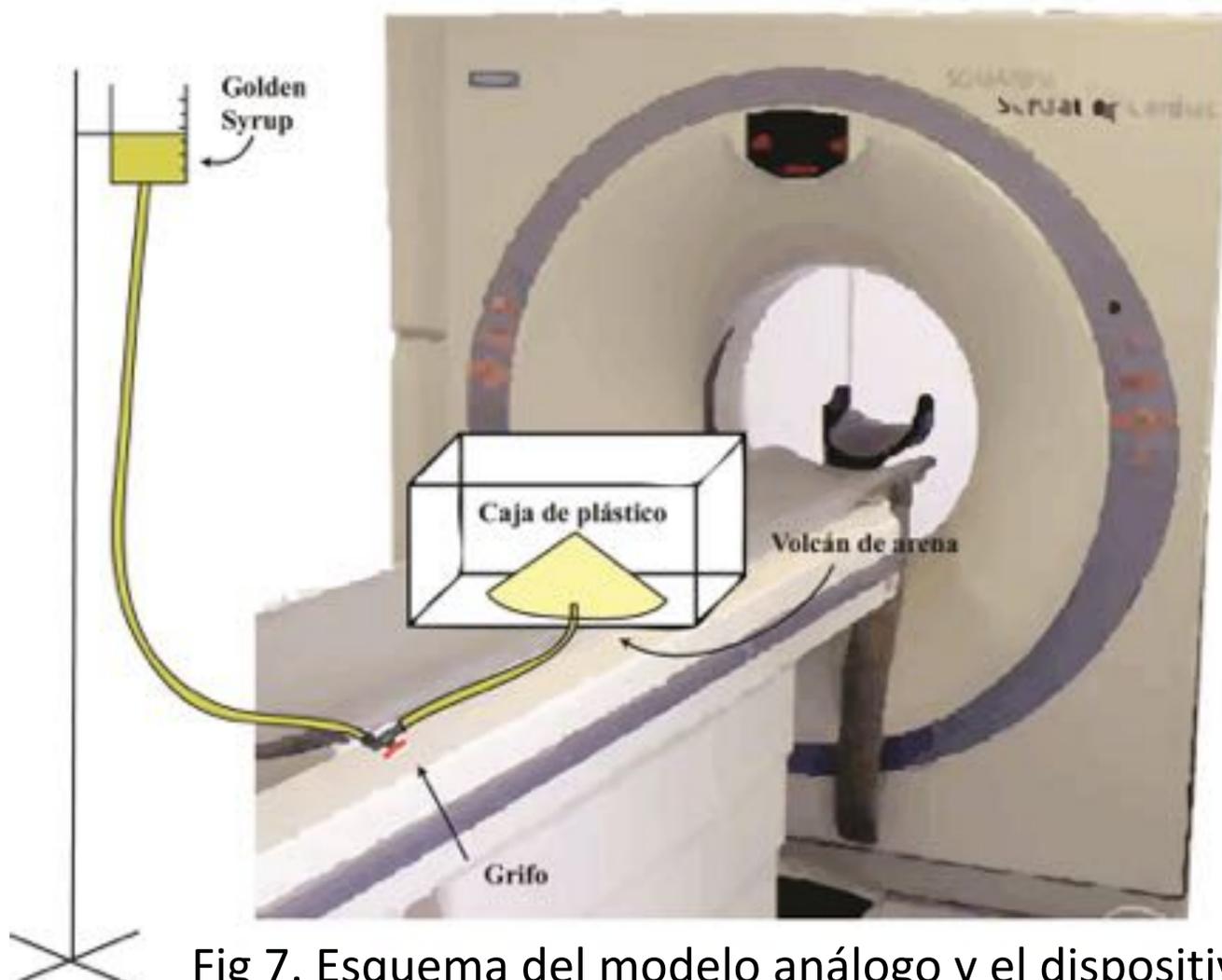


Fig 7. Esquema del modelo análogo y el dispositivo en la mesa del TCMD



Fig 8. Fotografía del Dispositivo en el TCMD durante un experimento



Fig 9. Fotografía del modelo tras La erupción. Véase fenómeno de hundimiento próximo al vértice y el reguero de sirope en superficie



Fig 10a. Topograma del dispositivo, Modelo y tubo de intrusión

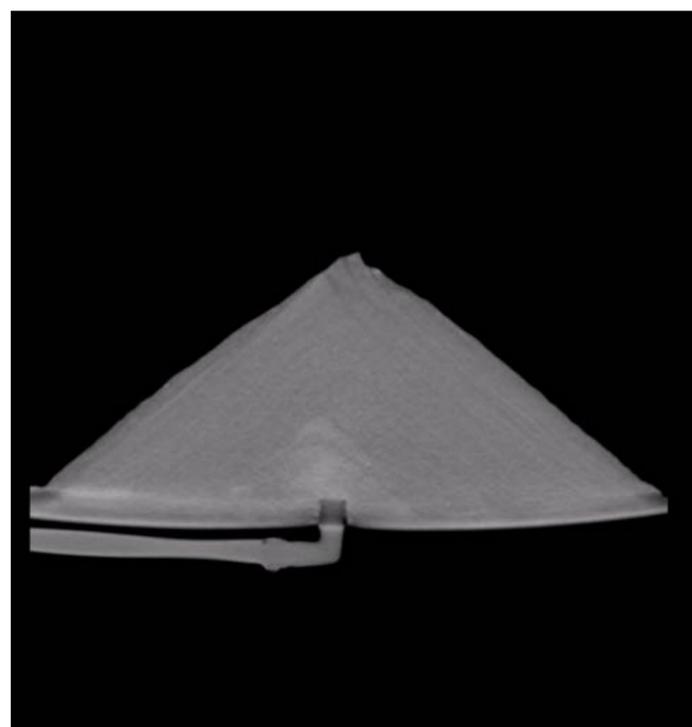


Fig 10b. MPR de del modelo en fase Inicial a través del tubo de intrusión

Métodos

- Hemos estudiado 44 modelos, 10 de ellos mediante TCMD con **estudio basal y a intervalos de 2 a 5 minutos** tras el comienzo de la introducción del sirope hasta el afloramiento del material a la superficie del cono (“erupción”).
- **Parámetros de la Adquisición:**
 - TC 64 detectores, Siemens Definition AS 64
 - Adquisición: 64x0,6 mm, Grosor: 1 mm
 - Pitch: 0,35
 - FOV: 31x31 mm
 - Reconstrucciones con Kernel Estándar B20 y con realce de bordes B75
 - Duración de la adquisición: 26 segundos
- **Postproceso Radiológico:**
 - Imágenes MPR
 - Reconstrucciones Rotatorias
 - Reconstrucciones Curvas
 - Reconstrucciones volumétricas VR
 - Fusión de diferentes fases dinámicas
- **Análisis de las imágenes**
 - Estudio focalizado en los 10-15 primeros minutos tras la inyección
 - Análisis de la formación de fracturas iniciales
 - Análisis de la morfología y situación de la cámara de magma
 - Análisis de la deformación de la superficie

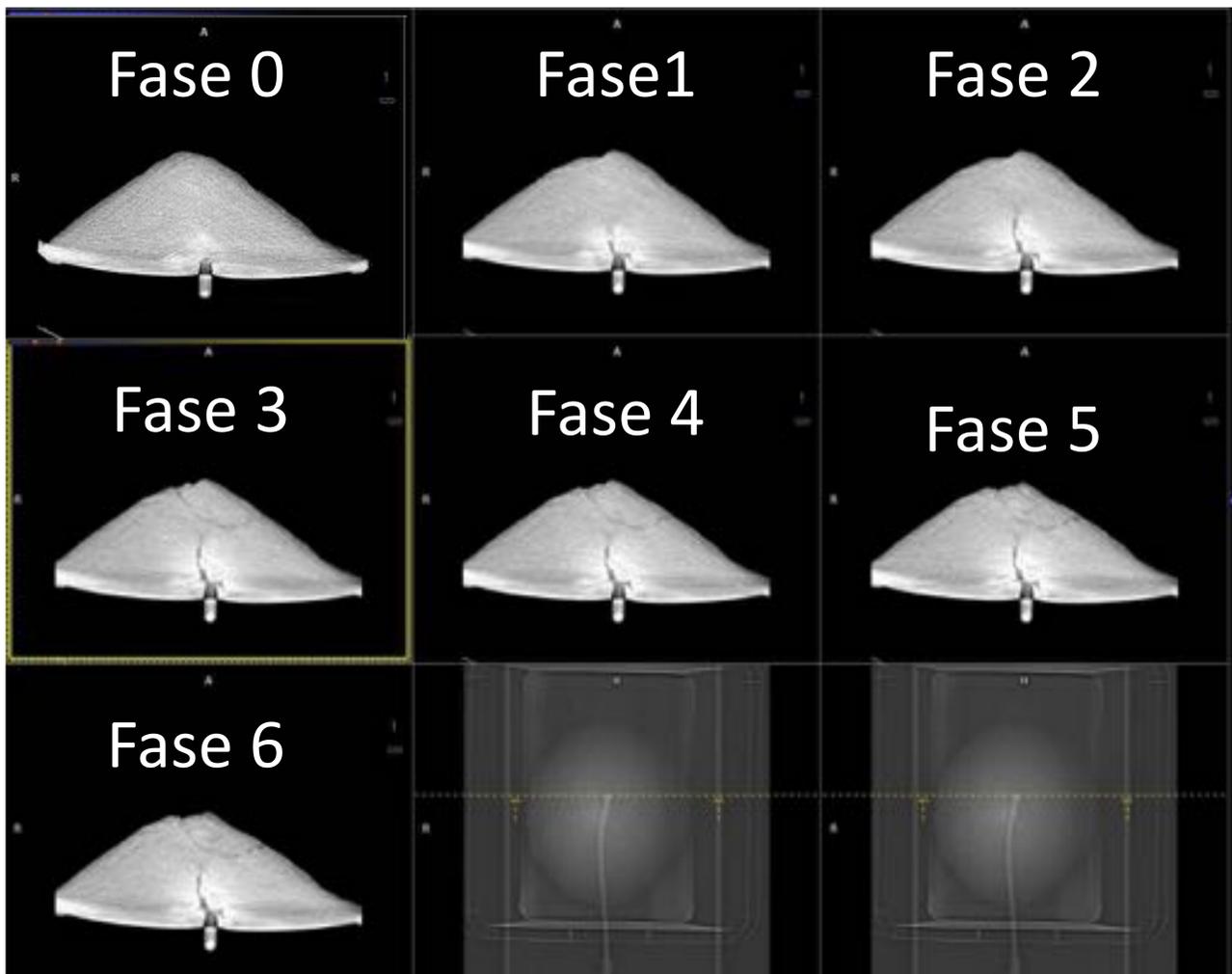
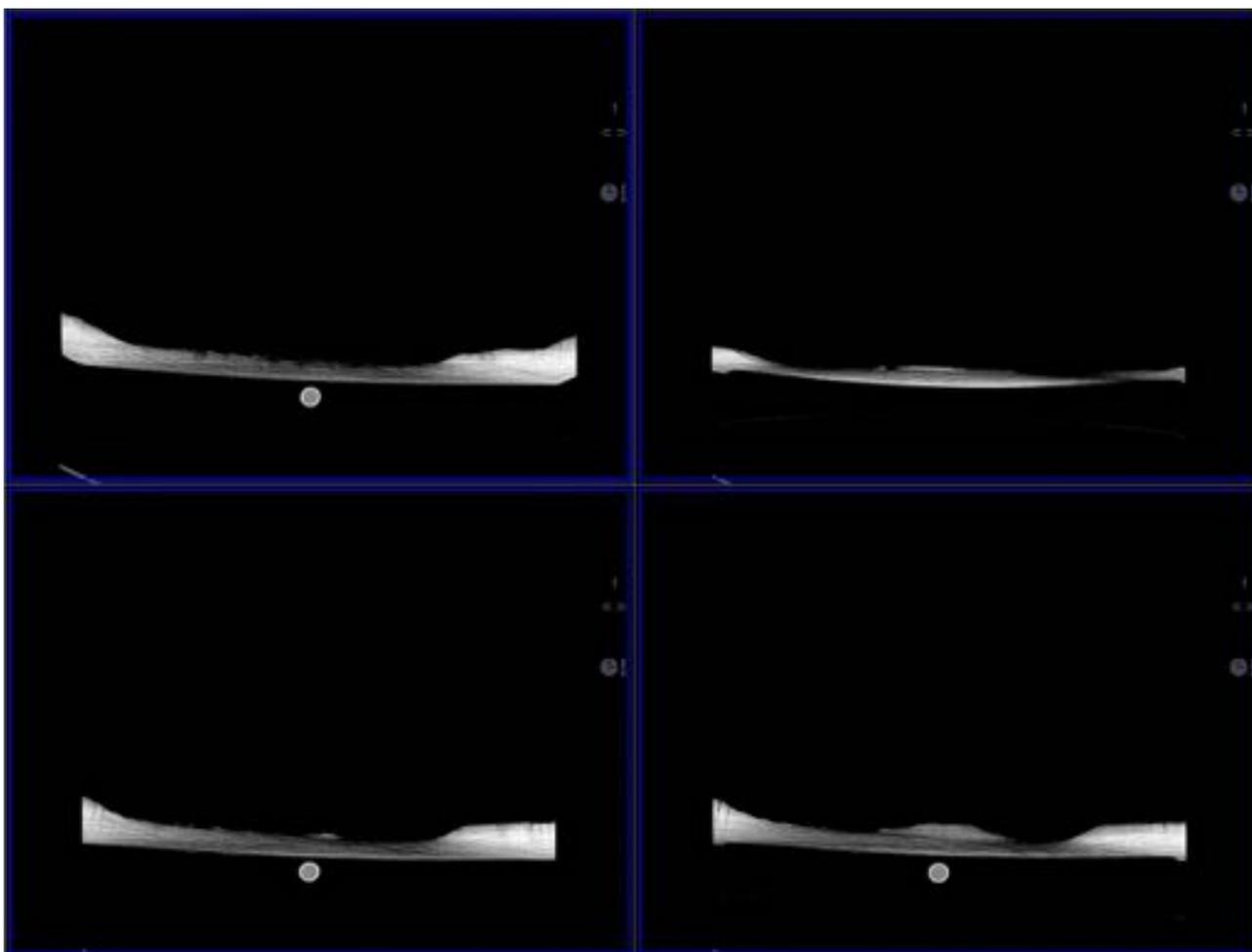


Fig 11. Sincronización de las fases de intrusión en MPR, comenzando por estudio basal, a intervalos de 5 min.



Video 1: Sincronización de fases 0, 3, 6 y 7 a intervalos de 5 min

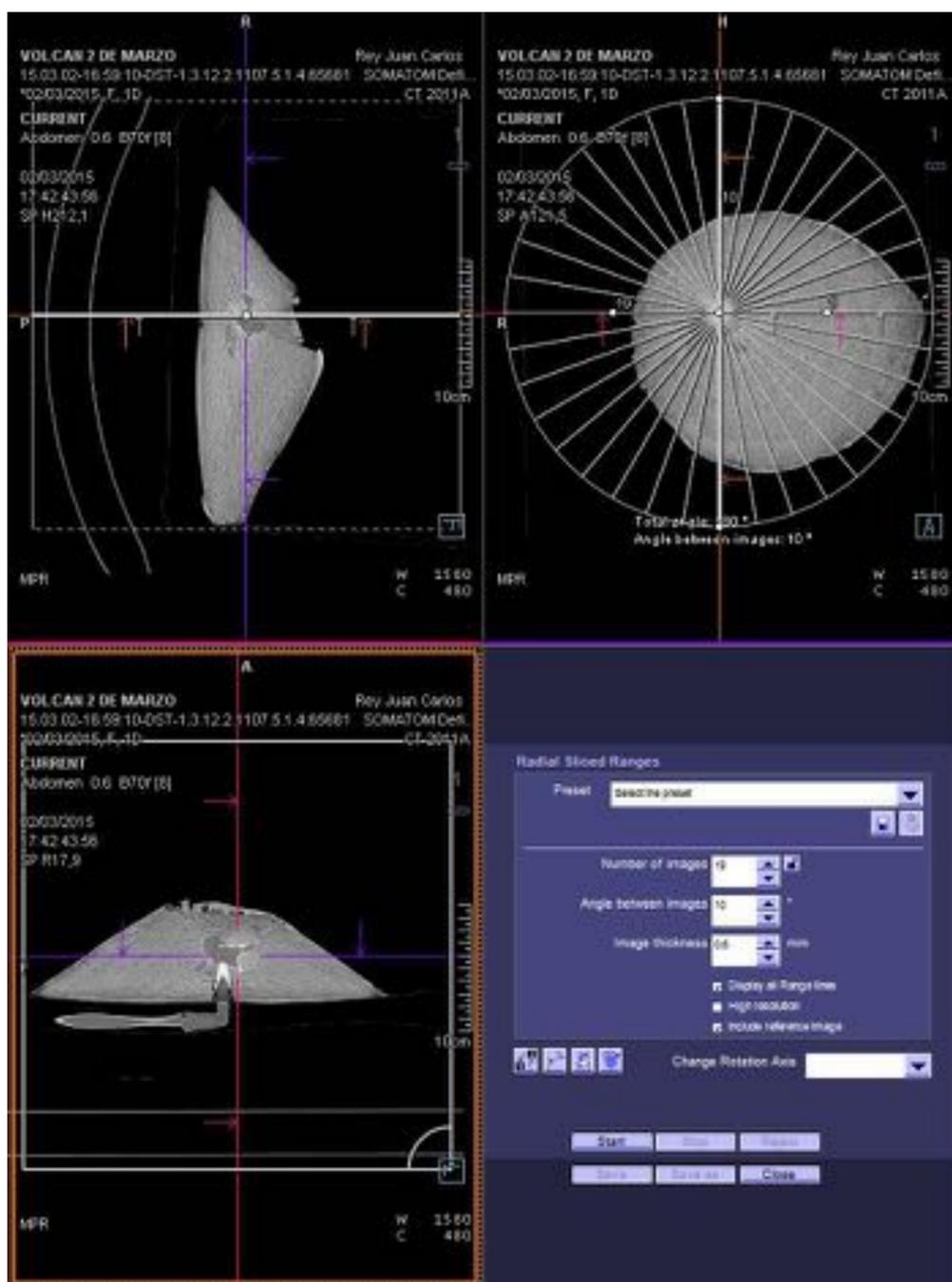
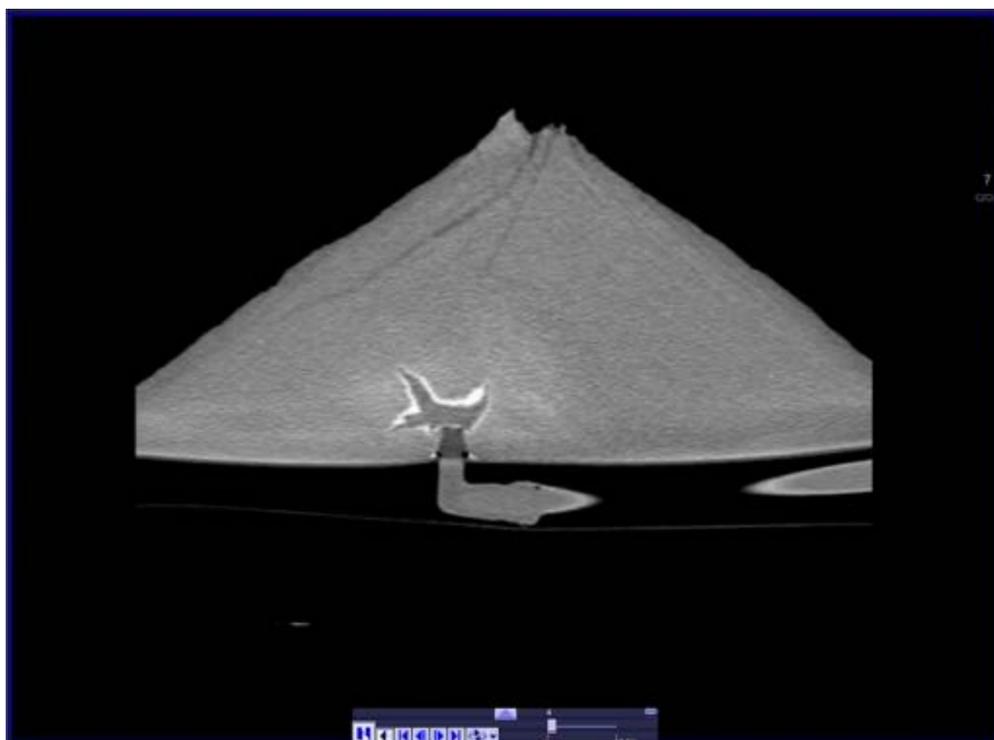


Fig 12. Reconstrucciones radiales centradas en punto de erupción en la fase final del experimento



Video 2: Reconstrucciones radiales en fase final.

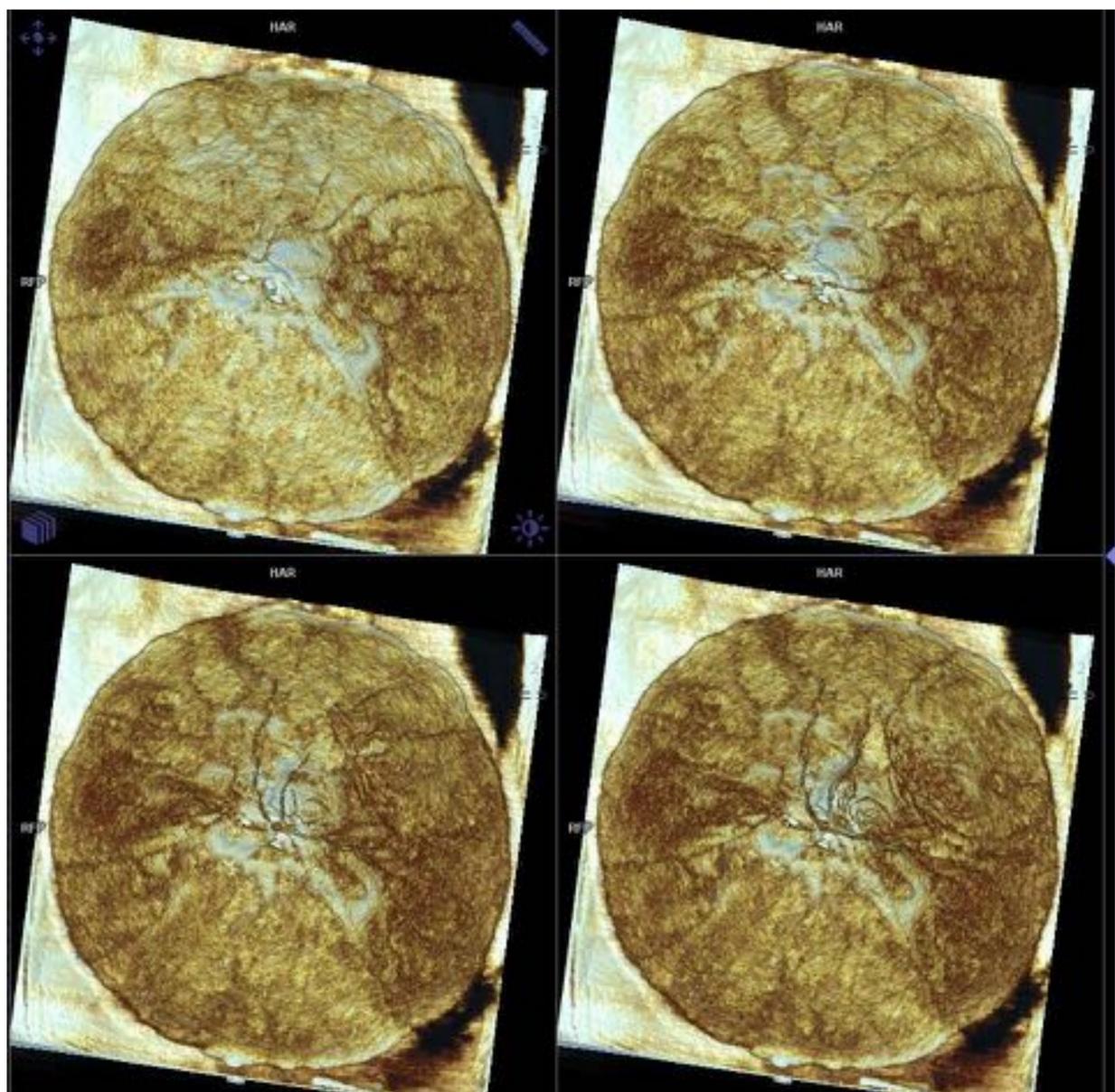
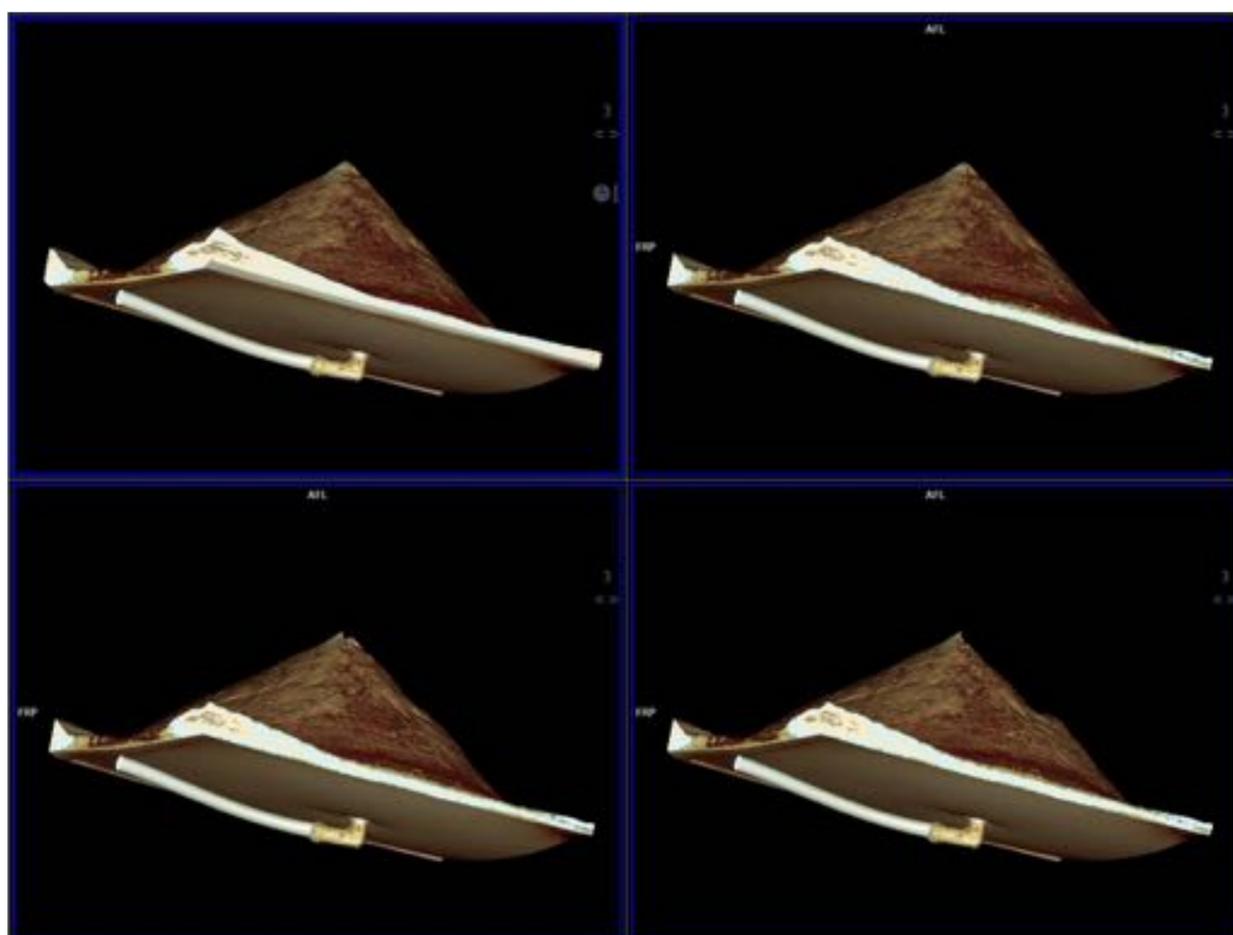


Fig 13. Reconstrucciones VR de superficie en fases 0, 2, 4 y 6. Véase la formación de fallas y hundimiento.



Vídeo 3. Rotación en superficie de las mismas fases que en figura anterior. Véase el tubo de entrada de sirope en 3D

Resultados

- Diferenciamos **tres patrones** en base a la intrusión magmática, formación de fracturas y deformación en superficie:
- **PATRÓN 1: 3/10 Casos**
 - Modelo simétrico y estable
 - Hundimiento casi simétrico, leve lateralización
 - Formación de pequeñas fracturas cerca de la cima

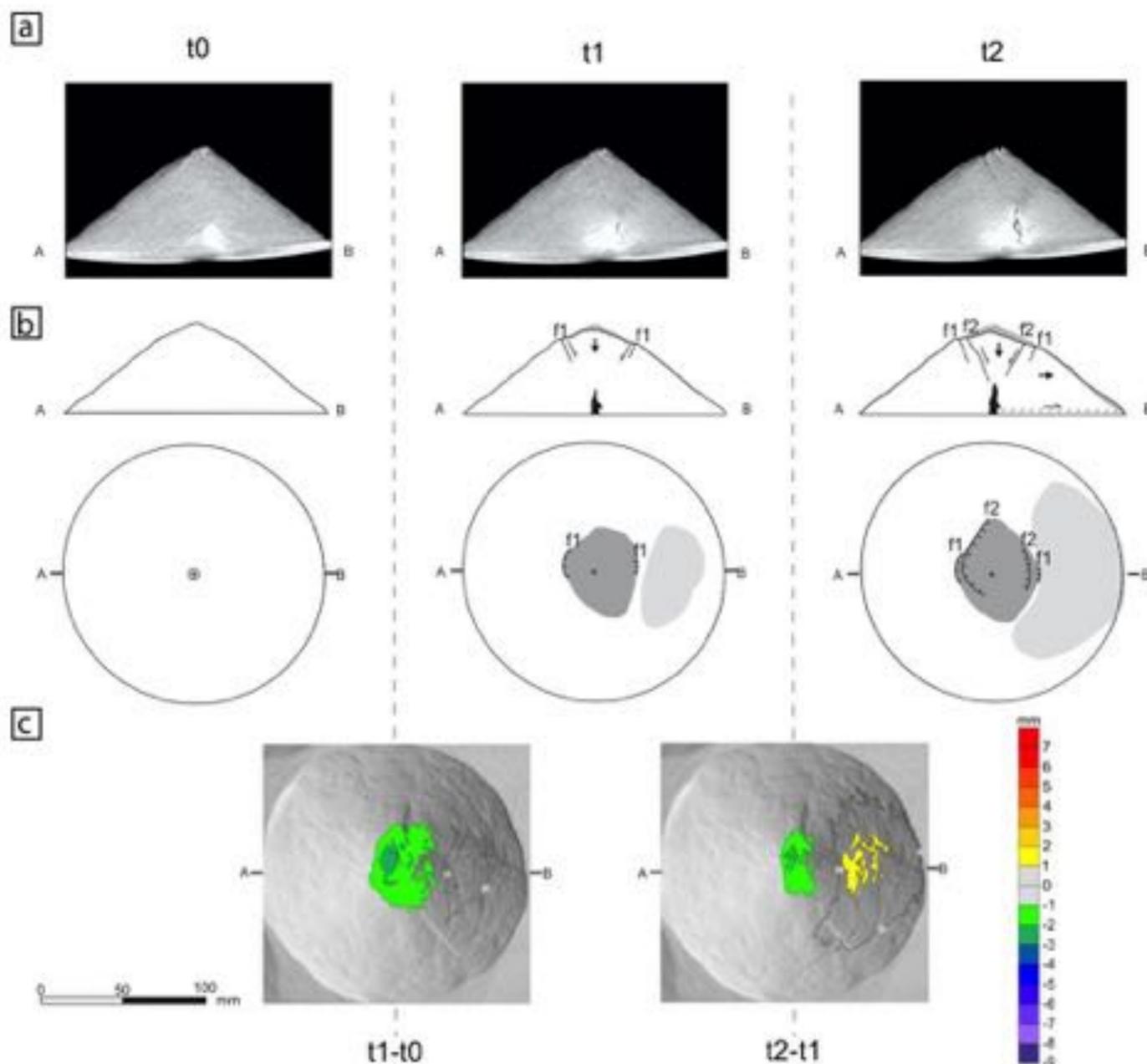


Fig 14. Patrón 1: **Fila a:** Imágenes seriadas del experimento
Fila b: esquema de corte transversal y cenital con formación de fallas.
 En gris oscuro áreas de hundimiento, en gris claro de sobreelevación.
Fila c: reconstrucción de superficie con software de detección de cambios
 en superficie según leyenda

Resultados

- **PATRÓN 2:** 5/10 Casos:
 - Modelo asimétrico y estable
 - Formación inicial de falla lateral hacia tercio medio de la ladera. Falla secundaria en flanco opuesto, cerca del vértice.
 - Aparece abultamiento inferior limitado por la falla inicial
 - Intrusión magmática en forma de cáliz irregular con desplazamiento hacia el abultamiento

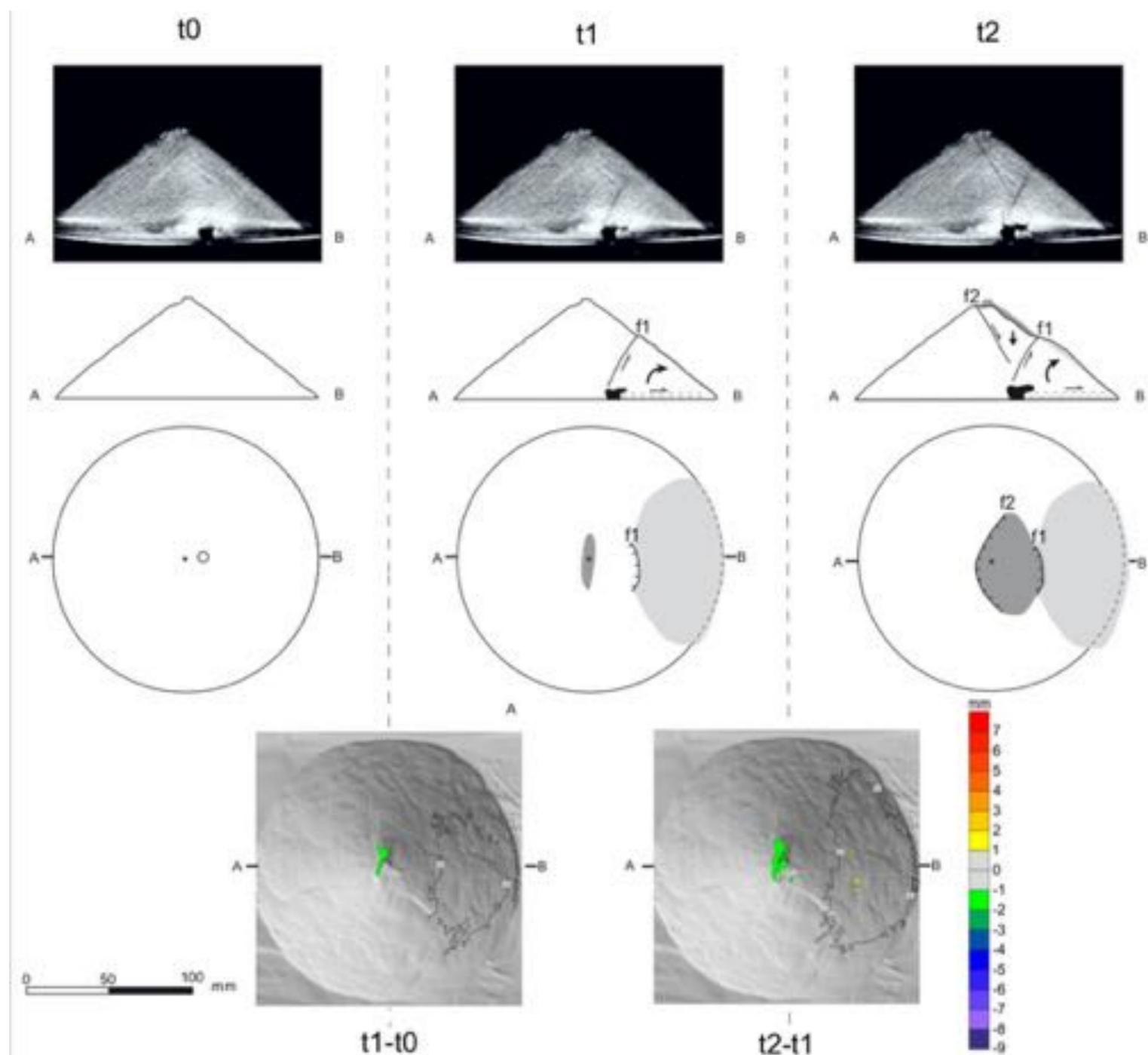


Fig 15. Patrón 2: **Fila a:** Imágenes seriadas del experimento
Fila b: esquema de corte transversal y cenital con formación de fallas. En gris oscuro áreas de hundimiento, en gris claro de sobreelevación.
Fila c: reconstrucción de superficie con software de detección de cambios en superficie según leyenda

Resultados

- **PATRÓN 3: 2/10 Casos:**
 - Modelo asimétrico e **inestable**
 - Formación de amplia falla inicial cerca de vértice con curso caudal que define sector inestable con posibilidad de desprendimiento rotacional
 - La intrusión adopta forma calicial hacia la región inferior de la falla principal
 - Formación de fallas secundarias en el sector inestable tanto desde el vértice del volcán, como desde el flanco, que convergen hacia la intrusión.
 - Surge abultamiento inferior y marcada deformidad.

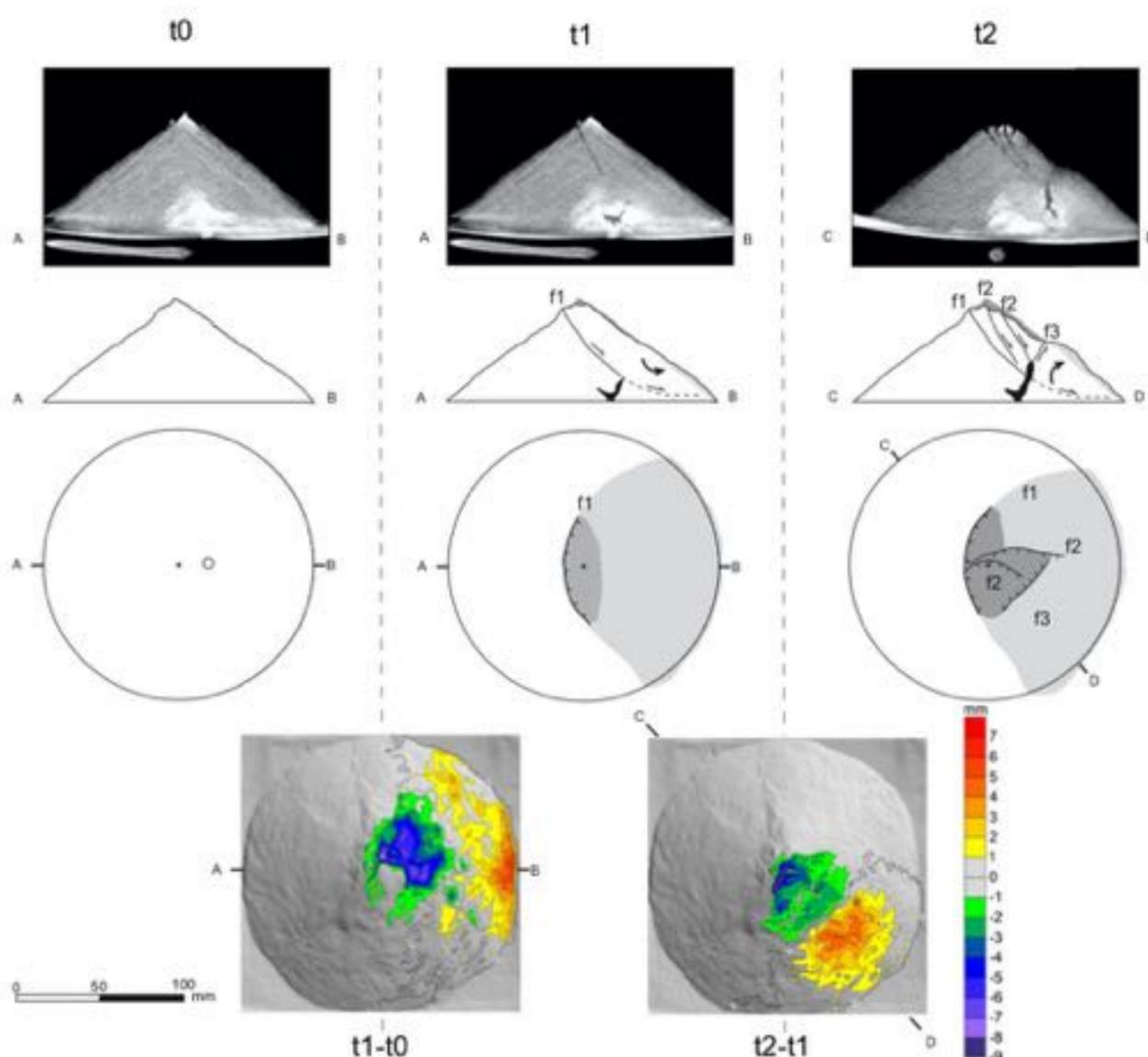


Fig 16. Patrón 3: **Fila a:** Imágenes seriadas del experimento
Fila b: esquema de corte transversal y cenital con formación de fallas.
 En gris oscuro áreas de hundimiento, en gris claro de sobre elevación.
Fila c: reconstrucción de superficie con software de detección de cambios
 en superficie según leyenda

Resultados

- Factores involucrados en la formación de los diferentes patrones:
 - No existe relación con los parámetros manipulados en el experimento: aparición indistinta con patrones de alto y bajo flujo de magma
 - Desplazamiento** involuntario del vértice con respecto al **punto de intrusión** en el momento de la construcción de la maqueta:
 - Desplazamiento > 2 cm:** relación con patrón asimétrico 2 o 3
 - No se encontraron parámetros predictores de patrón 2 versus 3

| Deformation pattern | Experiment Number | Flow rate (cm ³ /min) | Distance tube center (cm) |
|---------------------|-------------------|----------------------------------|---------------------------|
| 1 | 9 | 2,0 | 1,8 |
| 1 | 13 | 3,1 | 0,8 |
| 1 | 14 | 1,3 | 1,0 |
| 2 | 5 | 1,3 | 3,5 |
| 2 | 6 | 1,5 | 2,6 |
| 2 | 7 | 1,0 | 2,5 |
| 2 | 10 | 1,1 | 2,7 |
| 2 | 16 | 3,1 | 3,6 |
| 3 | 4 | 2,5 | 2,7 |
| 3 | 15 | 1,6 | 2,3 |

Tabla 1. Relación de los diferentes experimentos, con patrón, flujo y distancia de la entrada del tubo al vértice.

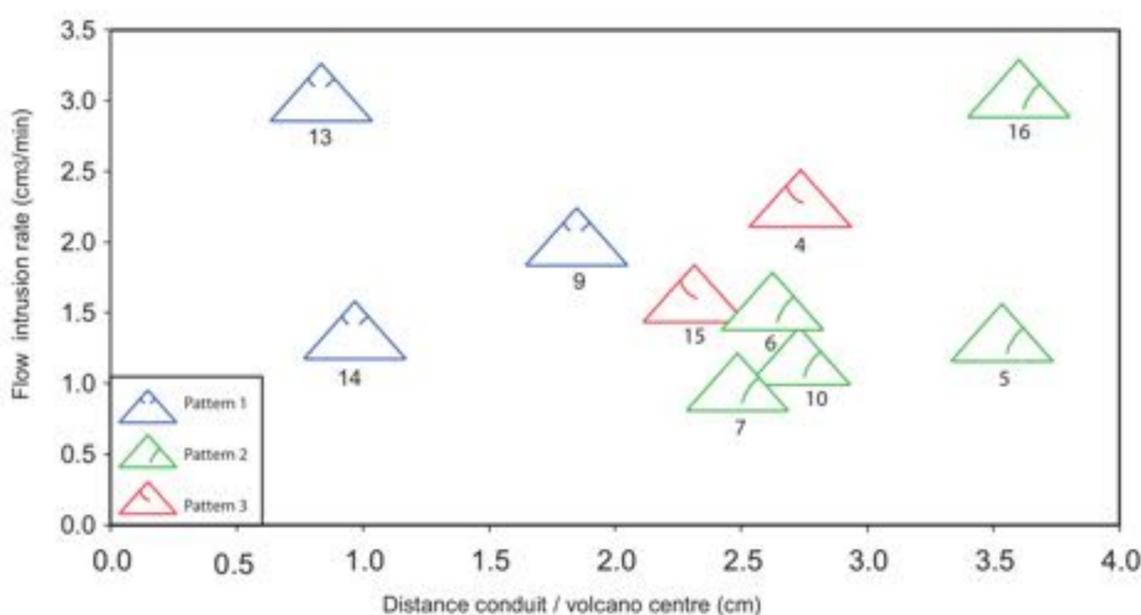


Fig 17. Relación entre patrones con flujo y distancia tubo-vértice

Discusión

- La relación de la formación de la **fractura principal en el Patrón 3** determina el comportamiento inestable del volcán y no había sido previamente descrita.
- La posibilidad y consecuencias del desprendimiento rotacional siguiendo el **plano de la fractura principal** lo asemeja a las erupciones catastróficas a estudio.
- La respuesta eruptiva vendría condicionada por la **relación temporal** entre el momento del deslizamiento y la posición de la intrusión magmática, definiendo dos escenarios posibles en el marco del Patrón 3:

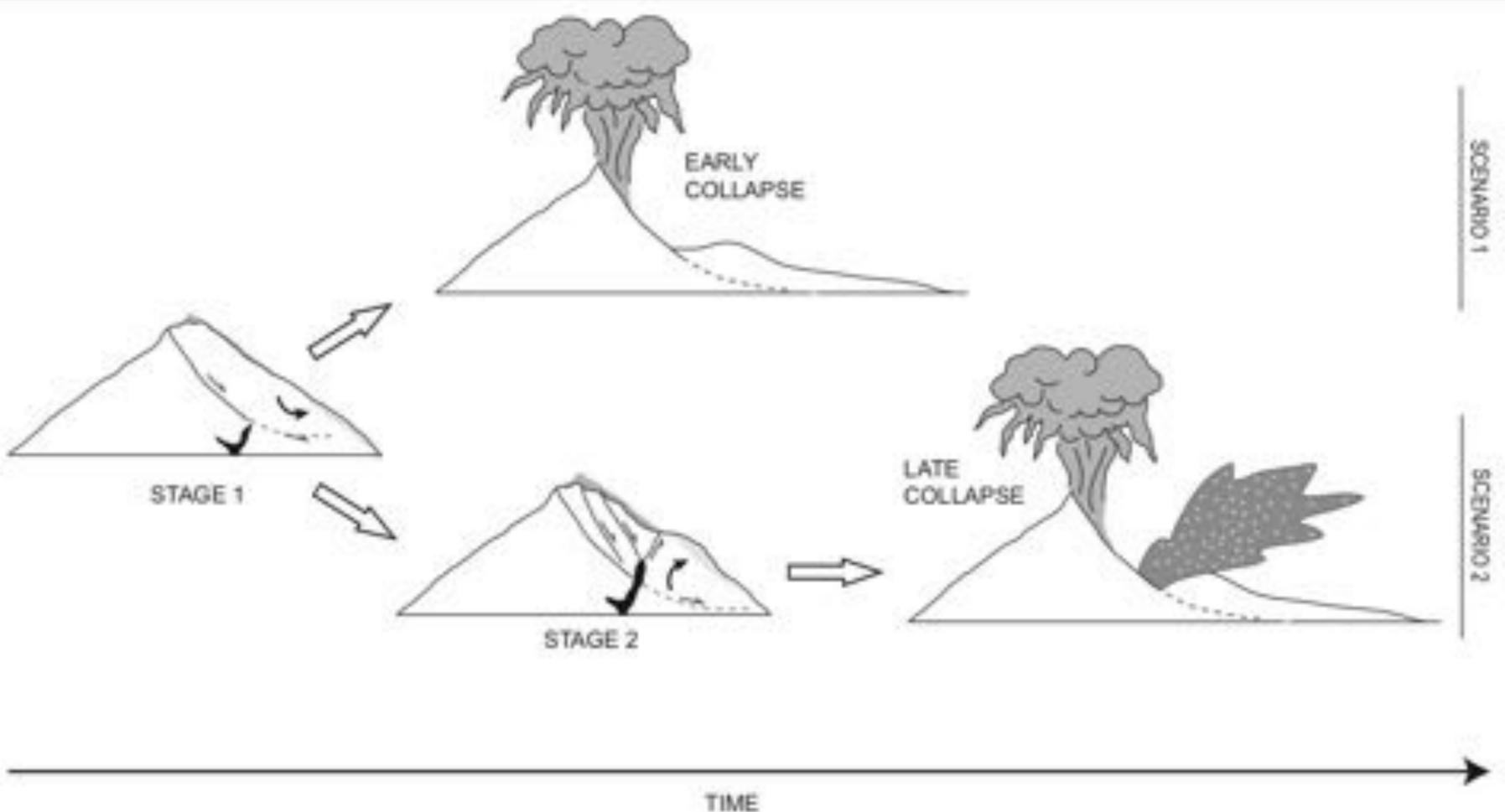


Fig 18. Esquema de los dos escenarios derivados del patrón 3, según el momento del colapso lateral

Discusión: Aportación del Radiólogo

- **Disponibilidad** en marco asistencial
- Valoración inicial de **materiales** del Modelo y Dispositivo:
 - Discriminación de contraste entre arena, sirope y aire. Conspicuidad de fracturas.
 - Atenuación óptima de materiales del dispositivo.
- Pruebas preliminares para elegir el **Protocolo de Adquisición**:
 - Protocolo que permita la mayor resolución sin tener en cuenta radiación
 - Pitch bajo para evitar rápido movimiento del dispositivo: Resultados distorsionados: 26 segundos de adquisición.
- **Reconstrucciones** para optimizar la detección de fracturas, intrusión magmática y deformidad en superficie.
- Óptima valoración de **fracturas lítricas** caracterizadas por morfología curva, de difícil valoración en un solo plano
- Valoración de la **evolución temporal** de fracturas e intrusión magmática
- **Analogía con la práctica clínica**:
 - Analogía con la detección de fracturas óseas:
 - Medición de lesiones y valoración de tendencias de crecimiento
 - Estudios dinámicos multifásicos

Visualización de Fracturas

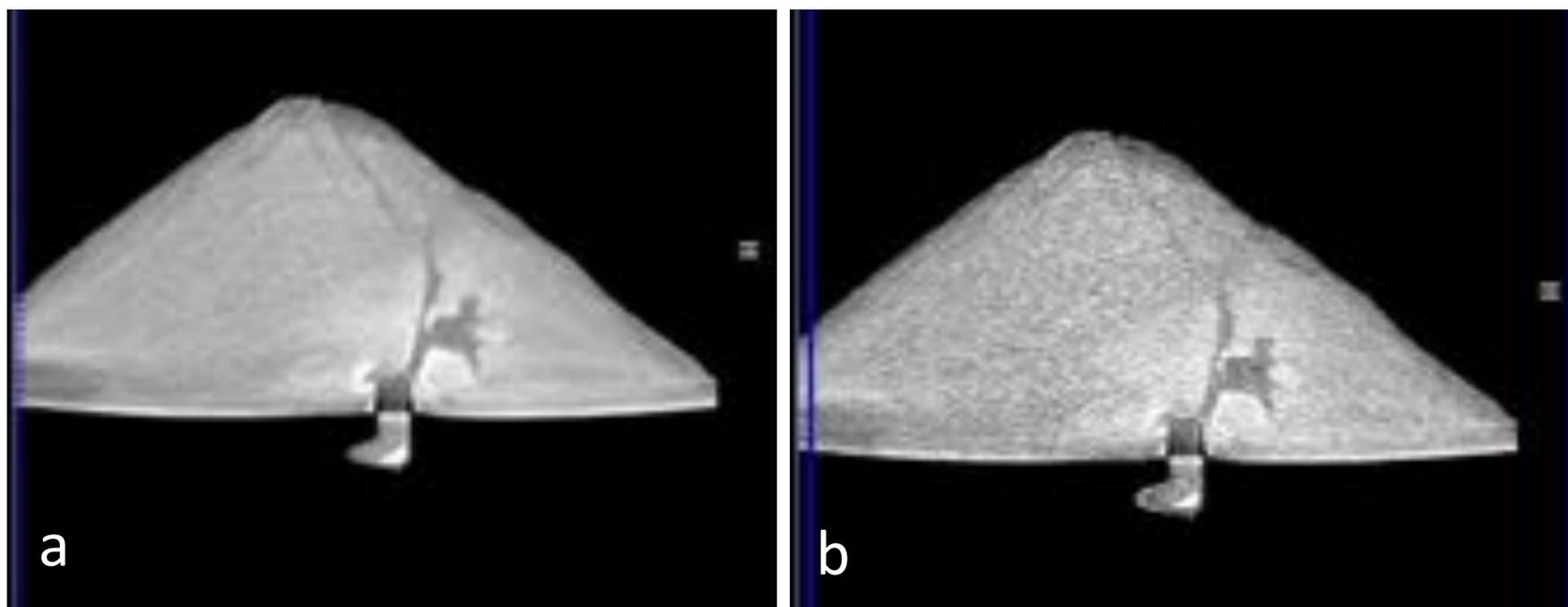


Fig 19. La visualización de fallas es mejor con el algoritmo de reconstrucción suave, Kernel 20 (a) que duro, Kernel 70 (b) ya que el artefacto de grano se suma al propio grano de la arena ocultando parcialmente las fracturas

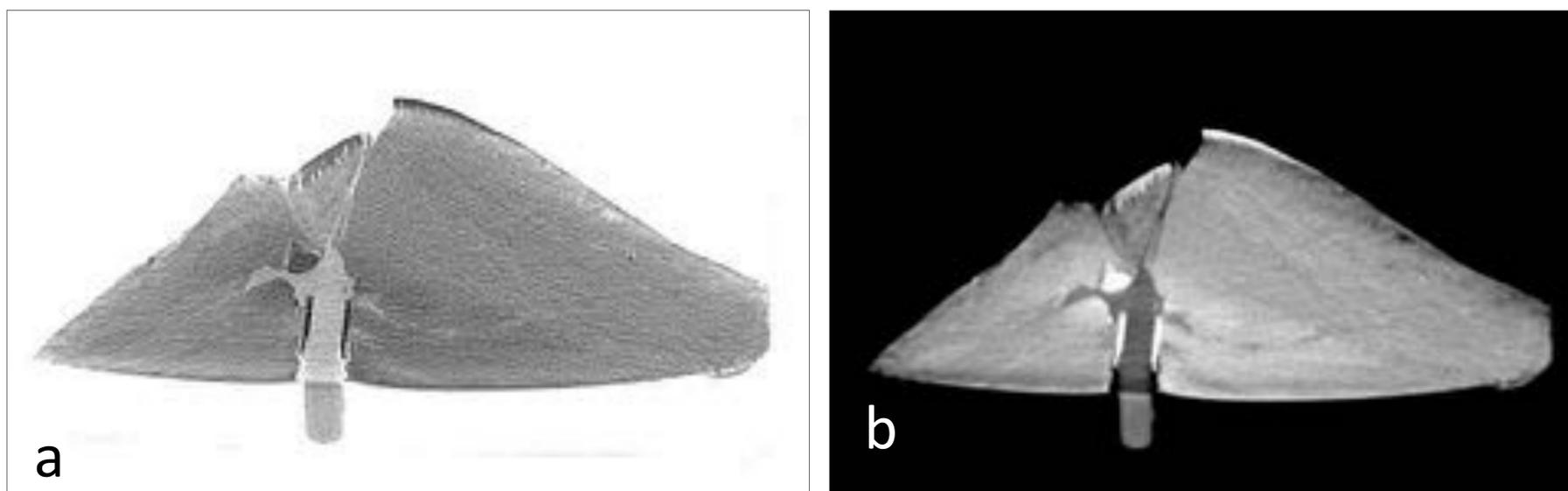


Fig 20. La visualización en negativo (a) no mejora la detección de fracturas con respecto al positivo (b)

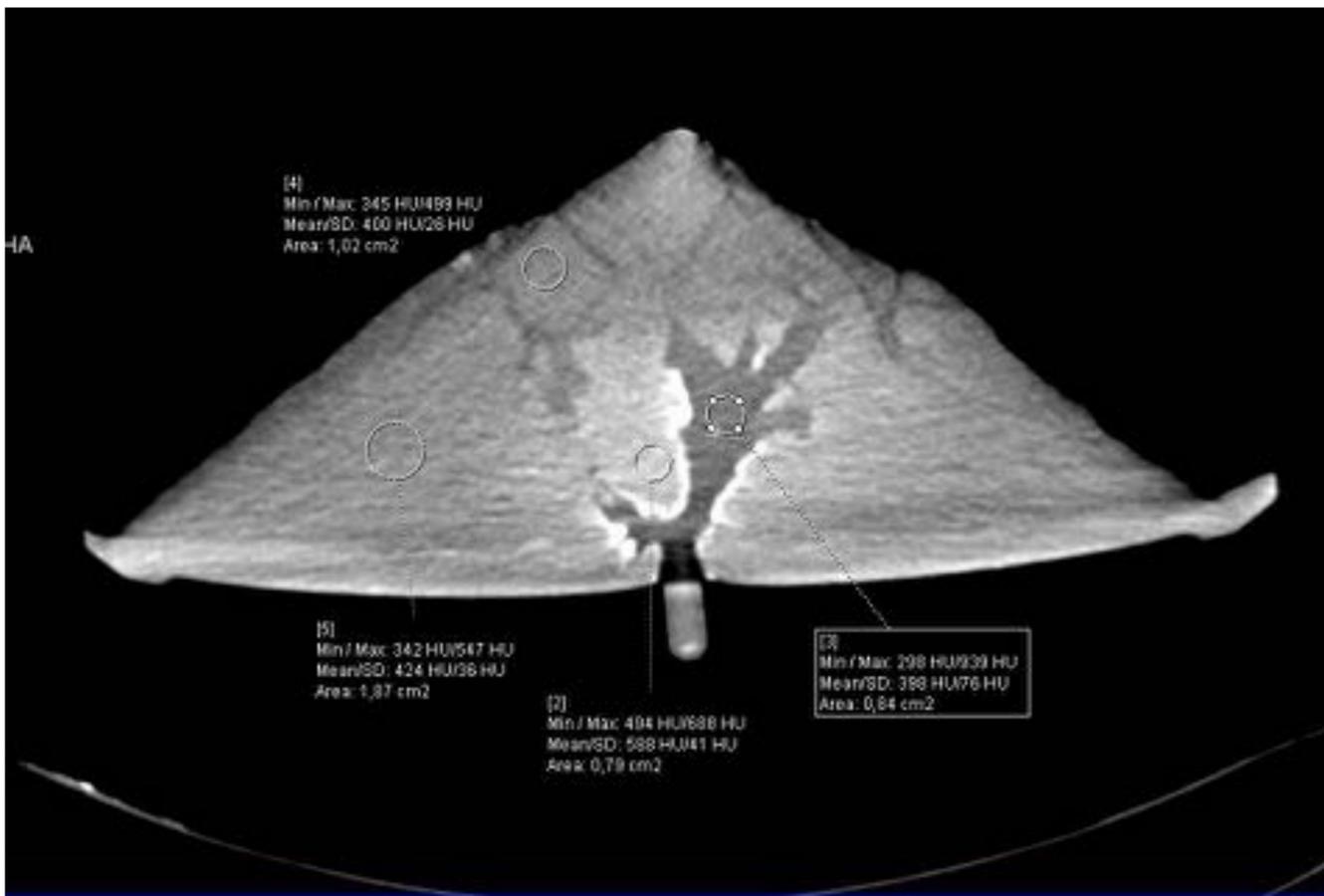


Fig 21. Estudio preliminar de las atenuaciones del sirope y partes del volcán donde se intuye compactación de arena en las áreas más hiperatenuantes

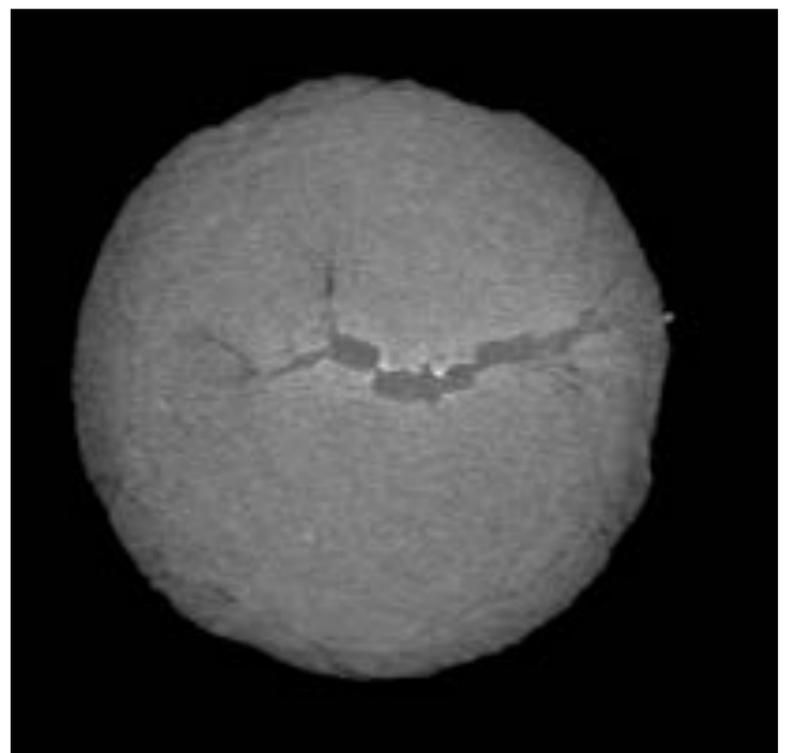
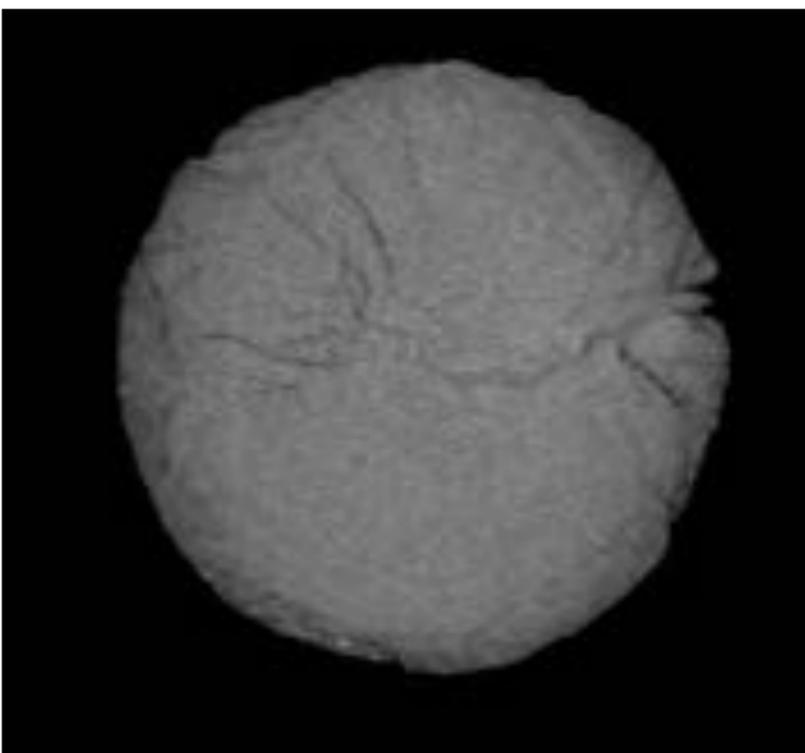


Fig 22. Estudio de fracturas en cortes paralelos a la base del volcán

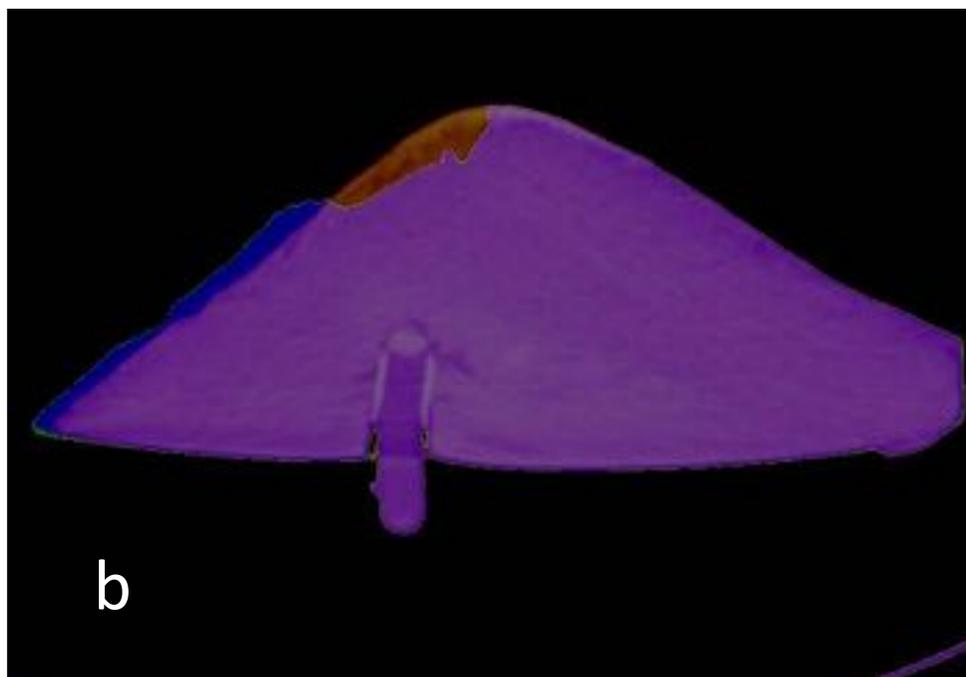
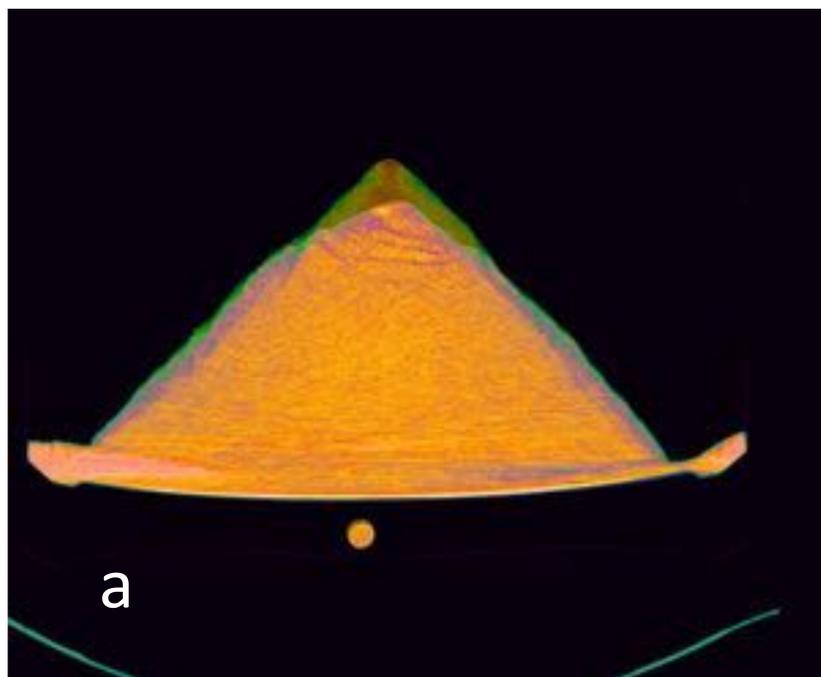


Fig 23. Fusión en MPR coloreado de corte inicial y final de dos experimentos, para valorar deformación. a: Patrón 1
b: Patrón 2

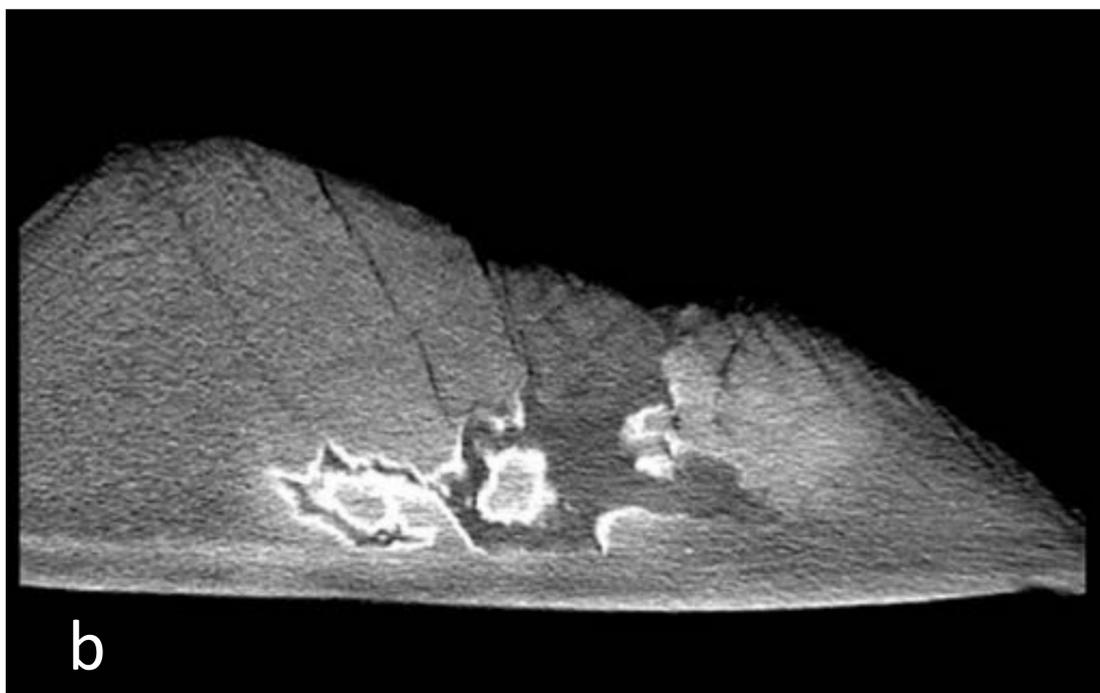
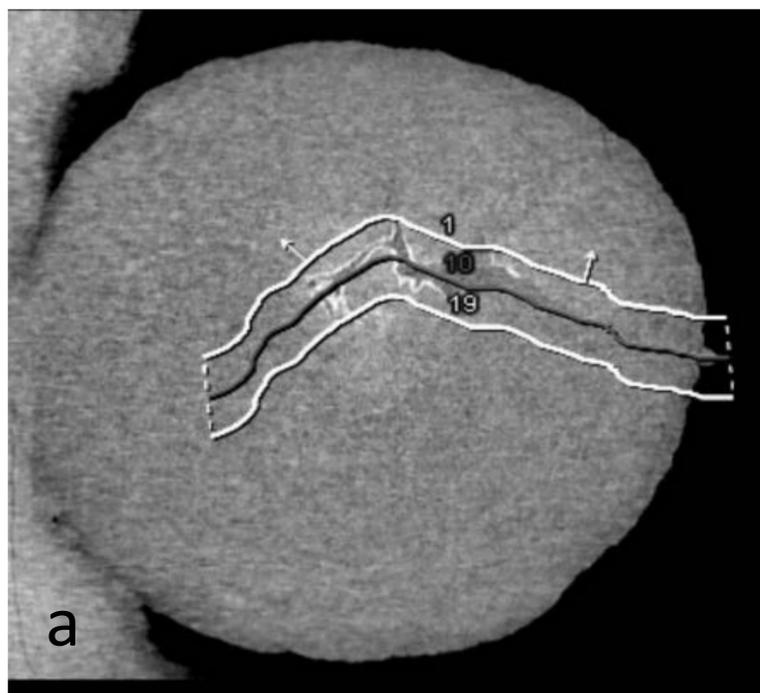


Fig 24. MPR curvo en torno a una línea de fractura.
a) Planificación. b) Resultado donde se aprecia relación entre fracturas e intrusión magmática.

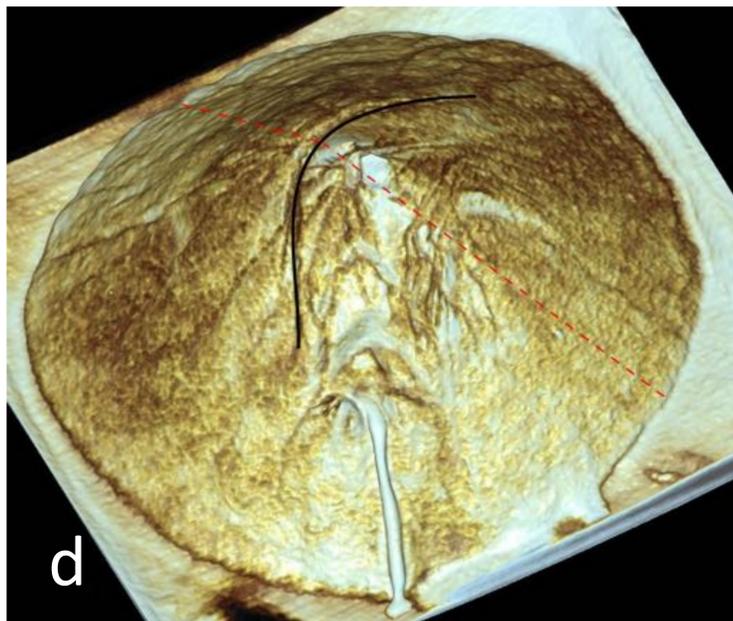
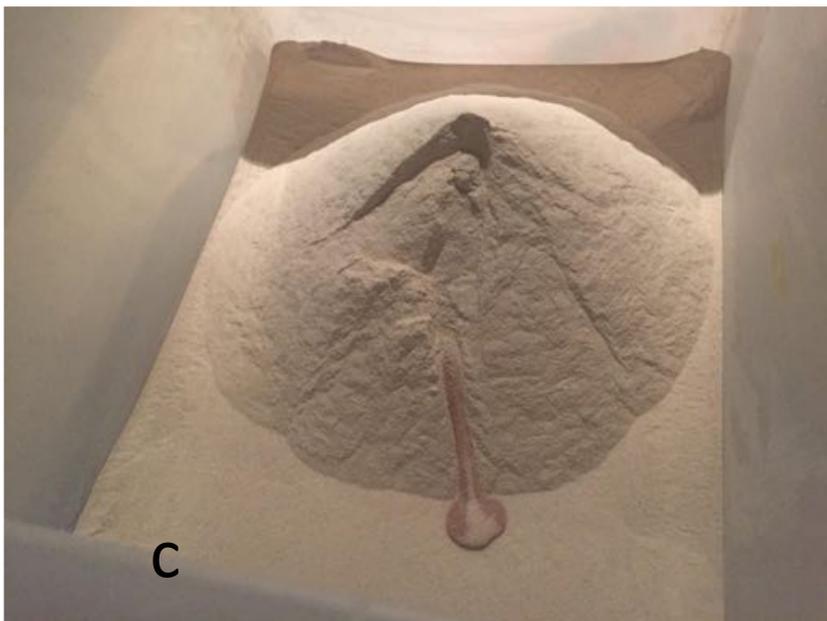
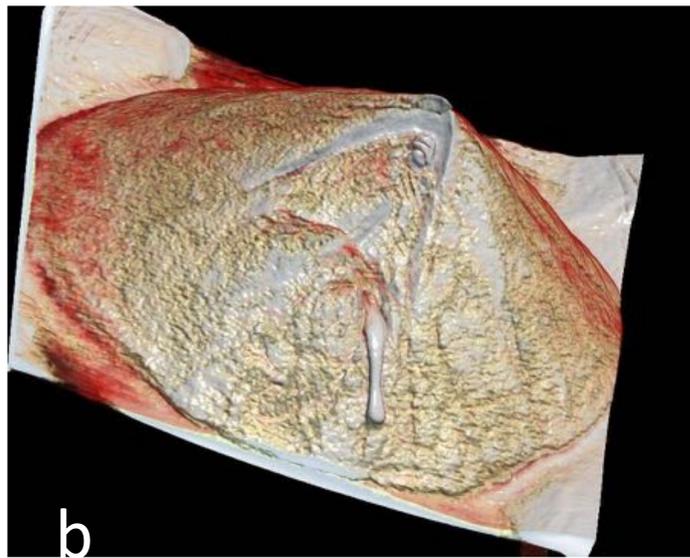


Fig 25. a) Fotografía del volcán Bezimianny y similitudes con c) fotografía de Modelo de patrón 3 y b) y d) reconstrucciones VR



Fig 26. a) Fotografía del Mount St Helens durante periodo eruptivo y similitudes con b) fotografía de modelo de arena

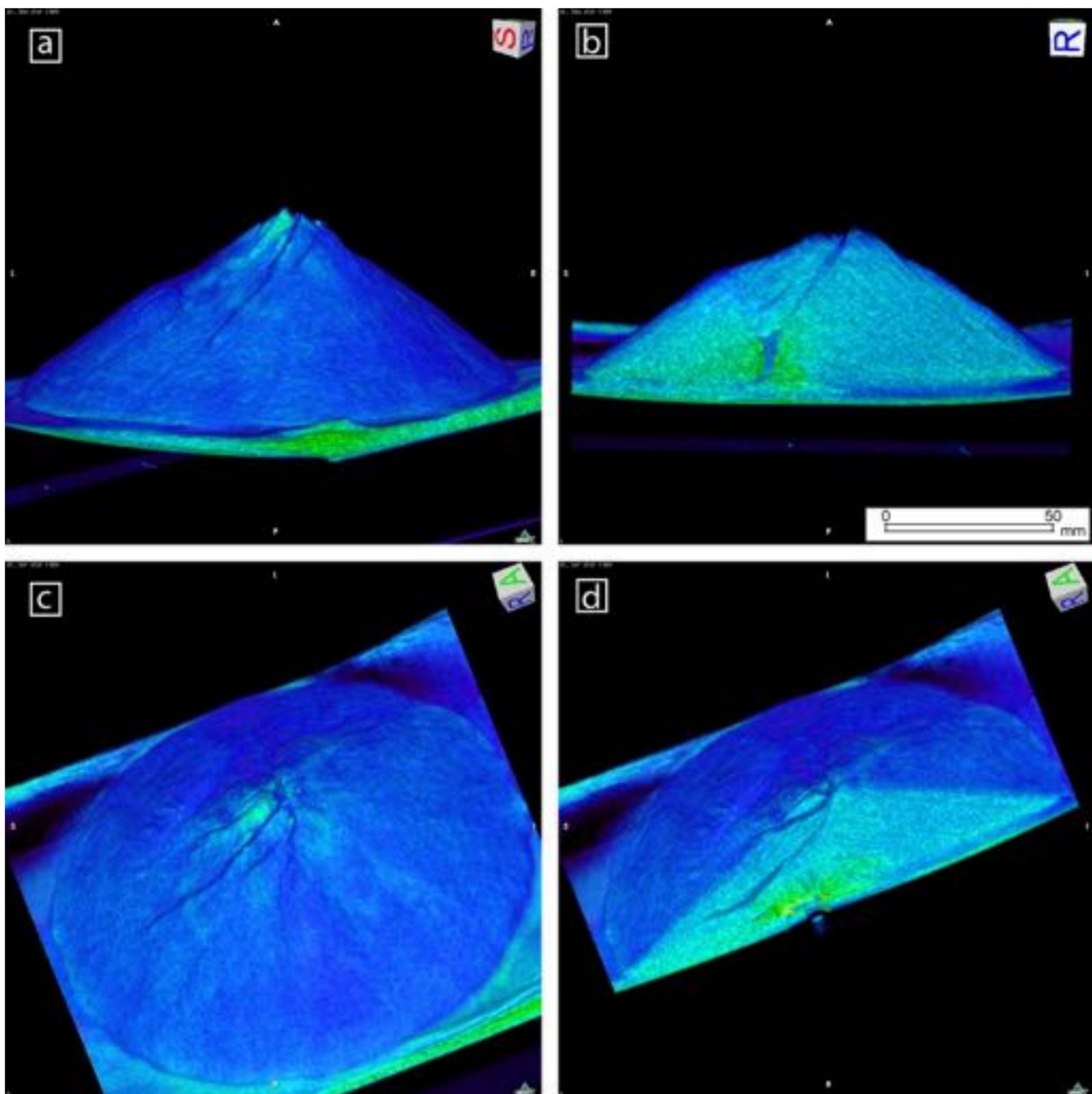


Fig 27. VR en Patrón 2. a) y c) Reconstrucción de superficie con formación de fallas en flanco. b) y d) Corte en el plano del vértice, pone de manifiesto las fracturas.

Direcciones Futuras

- Búsqueda de factores predictores de Modelos asimétricos: Patrón 2 versus Patrón 3.
- Buscar factores predictores entre escenario 1 y 2 del Patrón 3, siendo el escenario 2 el más destructivo
- Estudio de la deformidad de la superficie puede aplicarse a **programas de vigilancia de volcanes** para predecir momento, lugar y tipo de erupción

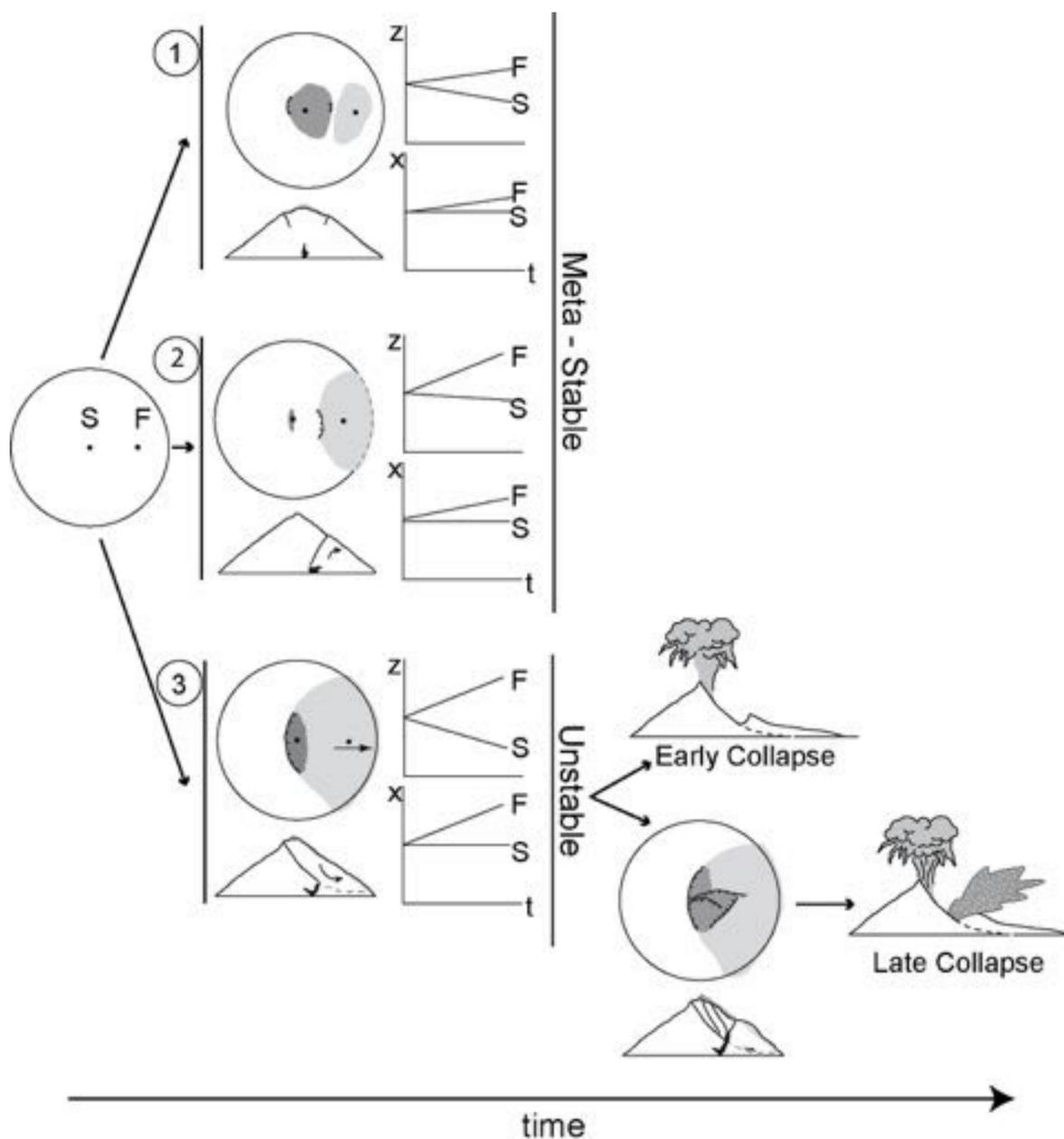


Fig 28. Hipótesis de la detección de los diferentes modelos en función del desplazamiento en superficie del vértice (S) y Flanco (F)

Conclusiones

- La aplicación de la tecnología TCMD puede ser utilizada en experimentos científicos fuera del ámbito sanitario.
- El radiólogo ofrece una ayuda inestimable permitiendo acceso a los equipos, optimización de la técnica y maximización de la información obtenida.
- En este caso nos ha ayudado a comprender mejor la dinámica eruptiva en el interior de volcanes identificando tres diferentes patrones, uno de ellos con alto potencial destructivo por su inestabilidad.

Bibliografía

1. Siebert, L., Glicken, H., & Ui, T. Volcanic hazards from Bezymianny-and Bandai-type eruptions. Bull. Volcanol. 49, 435-459 (1987).
2. Lipman, P. W., Moore, J. G., & Swanson, D. A. in The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington (eds Lipman, P.W. & Mullineaux, D.R.) 143-156 (US Geol Surv Prof Pap, Washington, 1981).
3. <http://www.mountsthelens.com/>
4. Donnadieu, F., Kelfoun, K., de Vries, B. V. W., Cecchi, E., & Merle, O. Digital photogrammetry as a tool in analogue modelling: applications to volcano instability. J. Volcanol. Geotherm. Res. 123, 161-180 (2003).
5. Adam, J., Klinkmüller, M., Schreurs, G., & Wieneke, B. Quantitative 3D strain analysis in analogue experiments simulating tectonic deformation: Integration of X-ray computed tomography and digital volume correlation techniques. J. Volcanol. Geotherm. Res. 55, 127-149 (2013).
6. Delcamp, A., de Vries, B. V. W., James, M. R., Gailler, L. S., & Lebas, E. Relationships between volcano gravitational spreading and magma intrusion. Bulletin of Volcanology, 74(3), 743-765 (2012).
7. Klinkmüller, M., Schreurs, G., Rosenau, M. & Kemnitz, H. Properties of granular analogue model materials: A community wide survey, Tectonophysics 684, Pages 23-38 (2016).