

98  
años

Ciencia para **proteger**nos,  
ciencia para **avanzar**



# Métodos de monitoreo y predicción de erupciones volcánicas. Ejemplos en Indonesia y Perú

Dr Philippe Lesage  
Institut des Sciences de la Terre  
Université Savoie Mont Blanc, Francia  
[lesage@univ-smb.fr](mailto:lesage@univ-smb.fr)



# La cooperación franco-peruana en volcanología

**El IRD (Institut de Recherche pour le Développement) en el Perú desde hace más de 50 años**

**Colaboraciones en geofísica de volcanes por parte de ISTERre y la Université Savoie Mont Blanc desde los años 90s, a través de varios convenios de cooperación entre el IGP y el IRD.**

**Principales investigadores involucrados:**

**Jean-Philippe Métaxian, Bernard Valette**

**Actividades de formación:**

- **Doctorado de Adolfo Inza Callupe**
- **Maestría de Edu Taipe**
- **Master de Roger Machacca Puma**
- **Doctorado de Roger Machacca Puma, asesores: Dr Hernando Tavera y Dr Philippe Lesage, beca de la Escuela Doctoral Franco-Peruana en Ciencias de la Ingeniería y Geociencias.**
- **...**

# Erupciones volcánicas recientes

## Pinutubo, Filipinas, 1991

La segunda erupción más grande del XX  
Precusores (sismos, gas, deformación)  
> 200,000 personas evacuadas a tiempo  
847 víctimas  
Unas 5000 vidas salvadas

## Mt Ontake, Japón, 2014

No precursores claros  
No alerta  
63 víctimas



Importancia del pronóstico de las erupciones



# Definiciones

## **Pronóstico o predicción:**

Evaluación de la probabilidad de ocurrencia de una erupción volcánica  
Pronóstico a largo o corto plazo

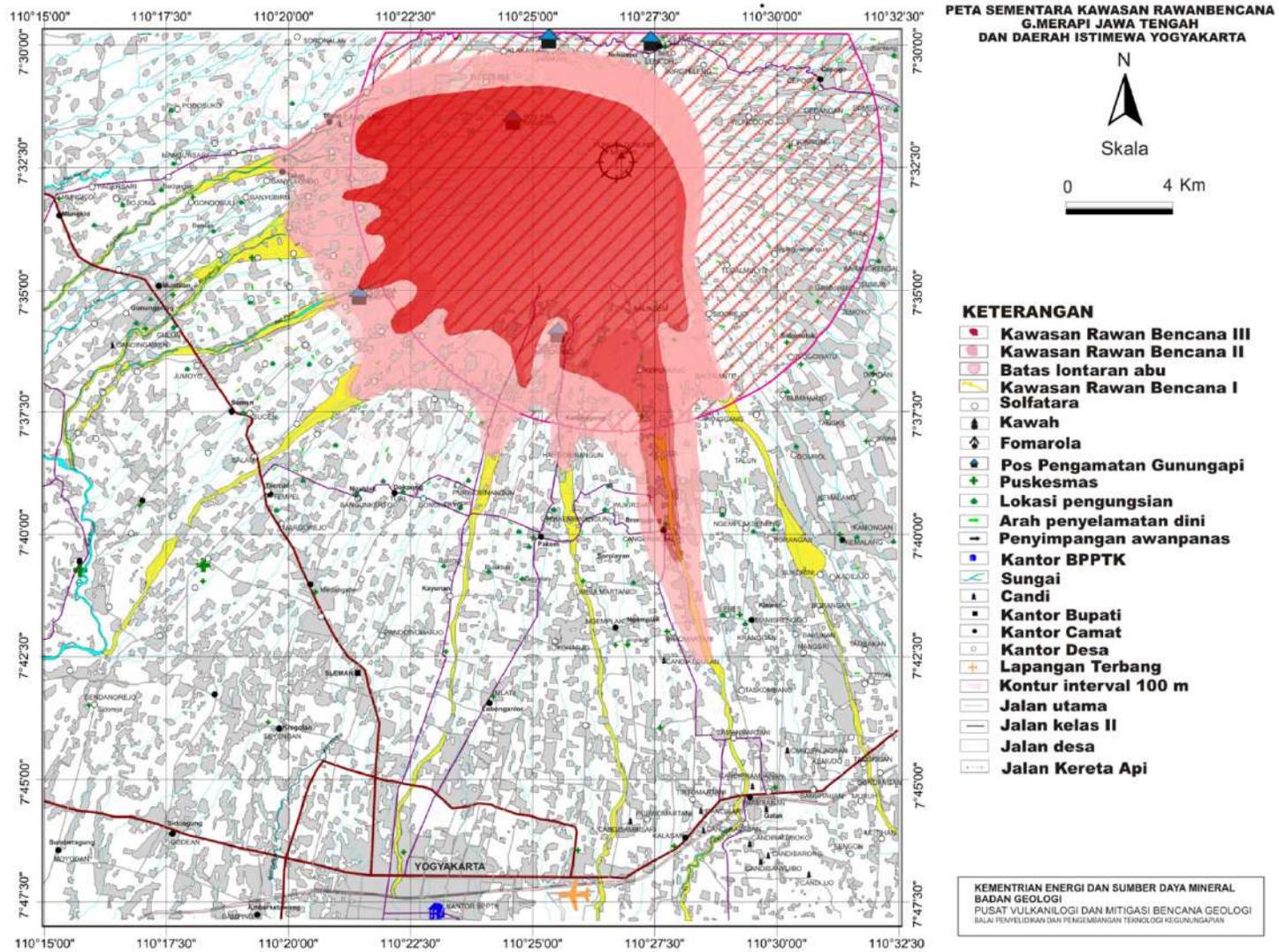
## **Largo plazo (años, siglos)**

Se reconstituye la historia eruptiva del volcán  
Se establecen mapas de peligro

## **Corto plazo (horas, días, meses):**

Detección de una posible erupción  
Alarma  
Evacuación de los habitantes de las zonas peligrosas.  
Se debe hacer en el momento adecuado.

# Mapa de amenazas del Merapi



# Definiciones

## Pronóstico o predicción:

Evaluación de la probabilidad de ocurrencia de una erupción volcánica

Pronóstico a largo o corto plazo

## Largo plazo (años, siglos)

Se reconstituye la historia eruptiva del volcán

Se establecen mapas de peligro

## Corto plazo (horas, días, meses):

Detección de una posible erupción

Alarma

Evacuación de los habitantes de las zonas peligrosas.

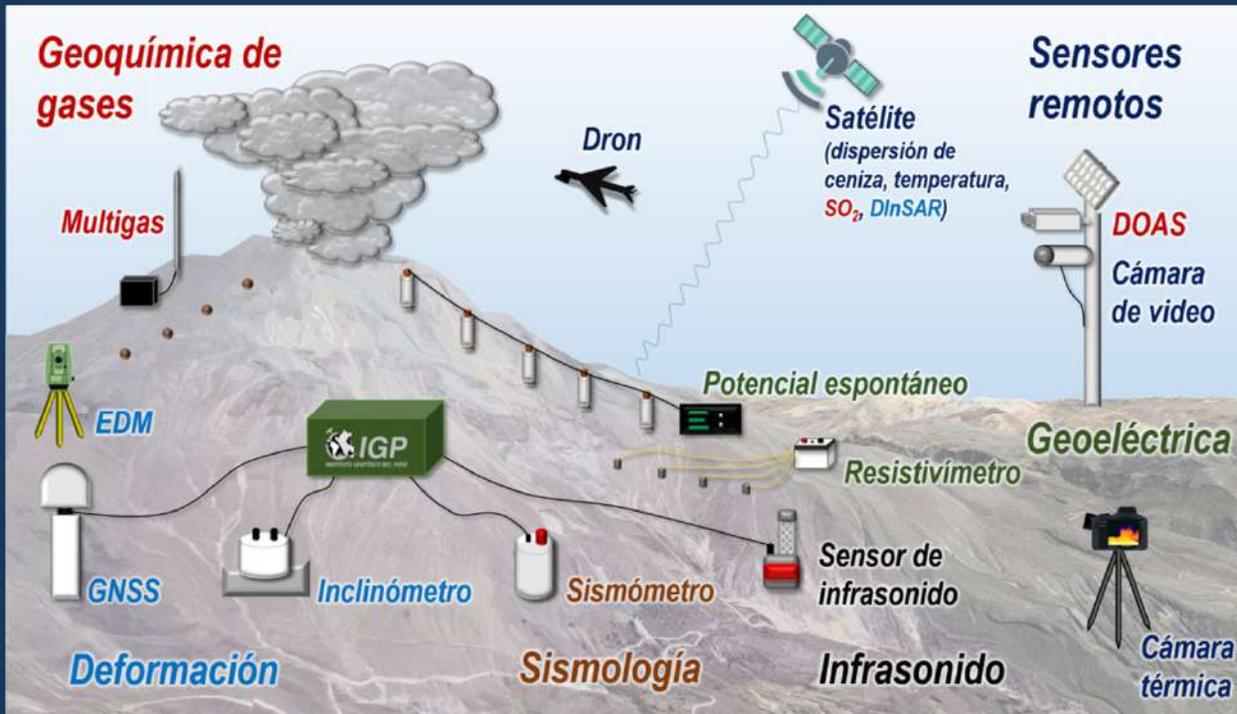
Se debe hacer en el momento adecuado.

# El árbol del pronóstico volcánico

Reactivación de un volcán



# Principales métodos de monitoreo



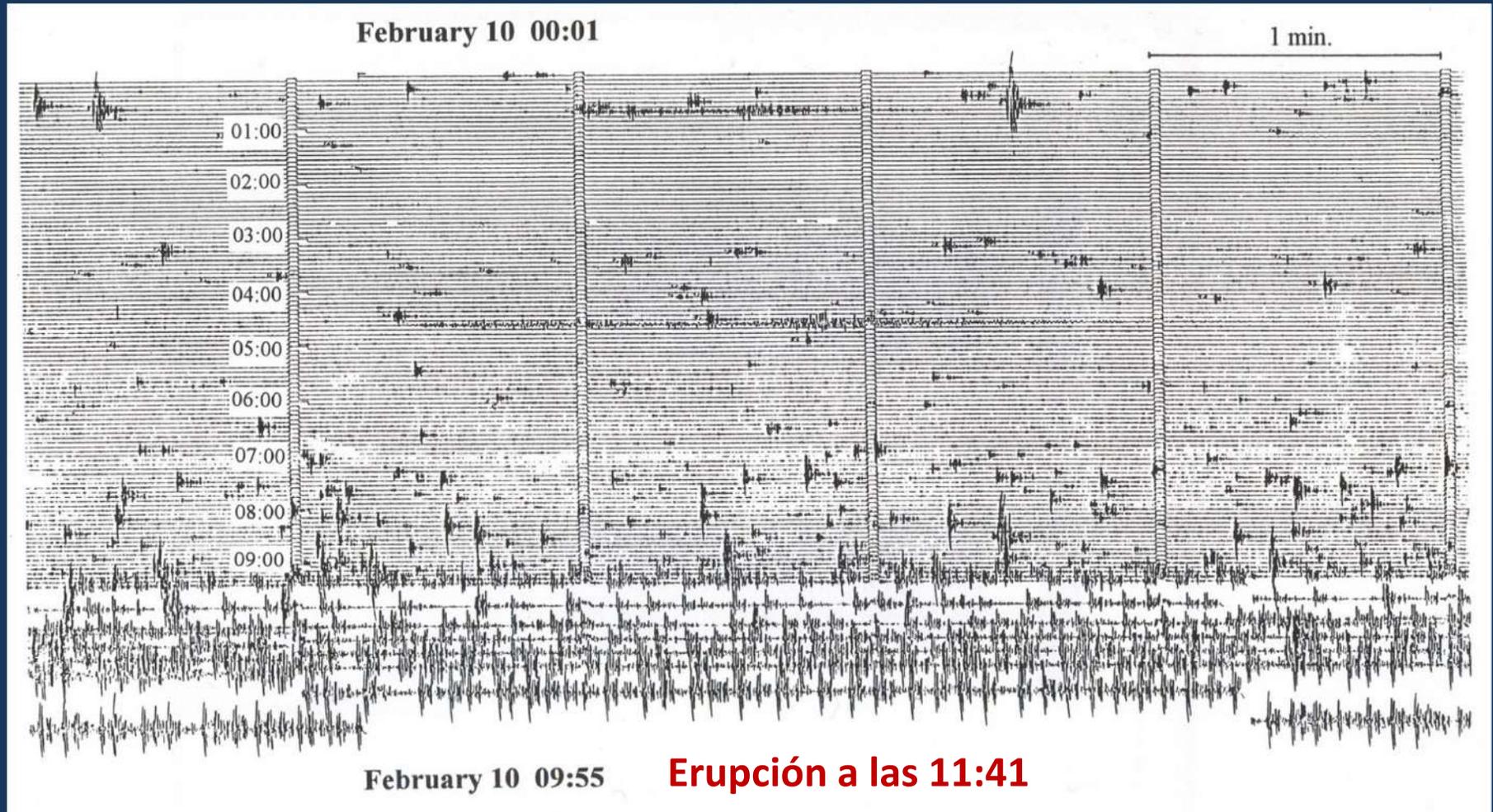
**Centro Vulcanológico  
Nacional (CENVUL)  
operado por el IGP**



# Precursores de erupción

## Actividad sísmica

Volcán Kelut, Indonesia, 1990

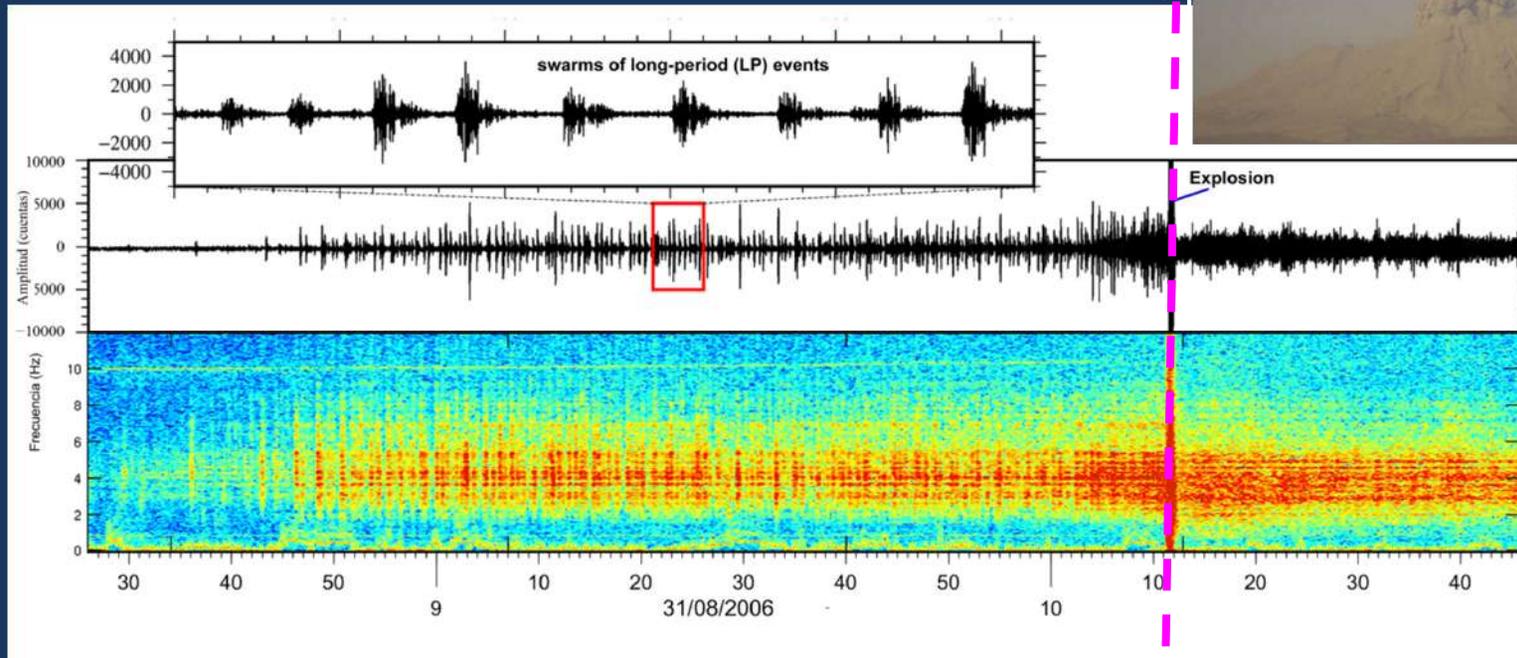


# Precursores de erupción

## Actividad sísmica

Volcán Ubinas

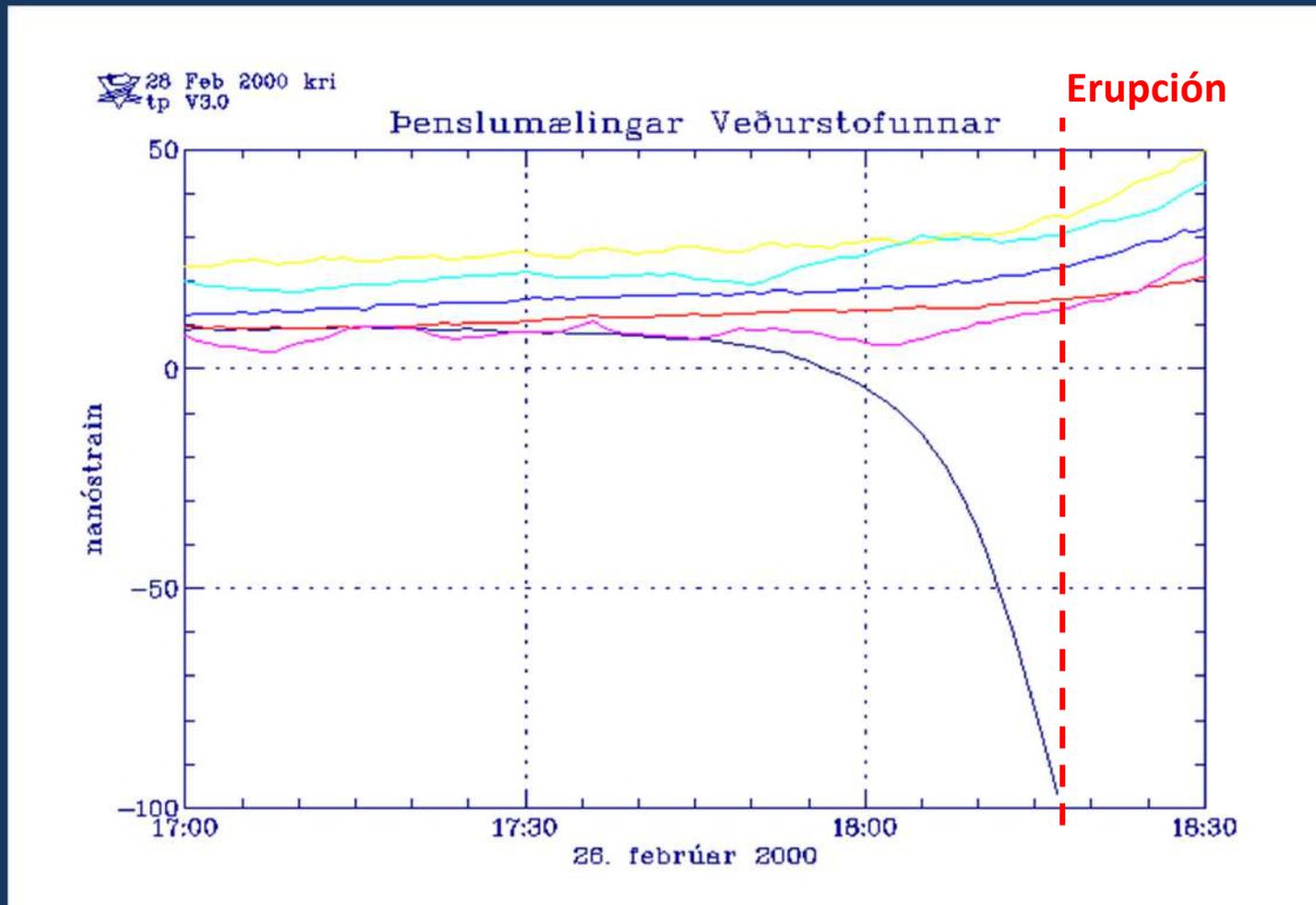
Erupción



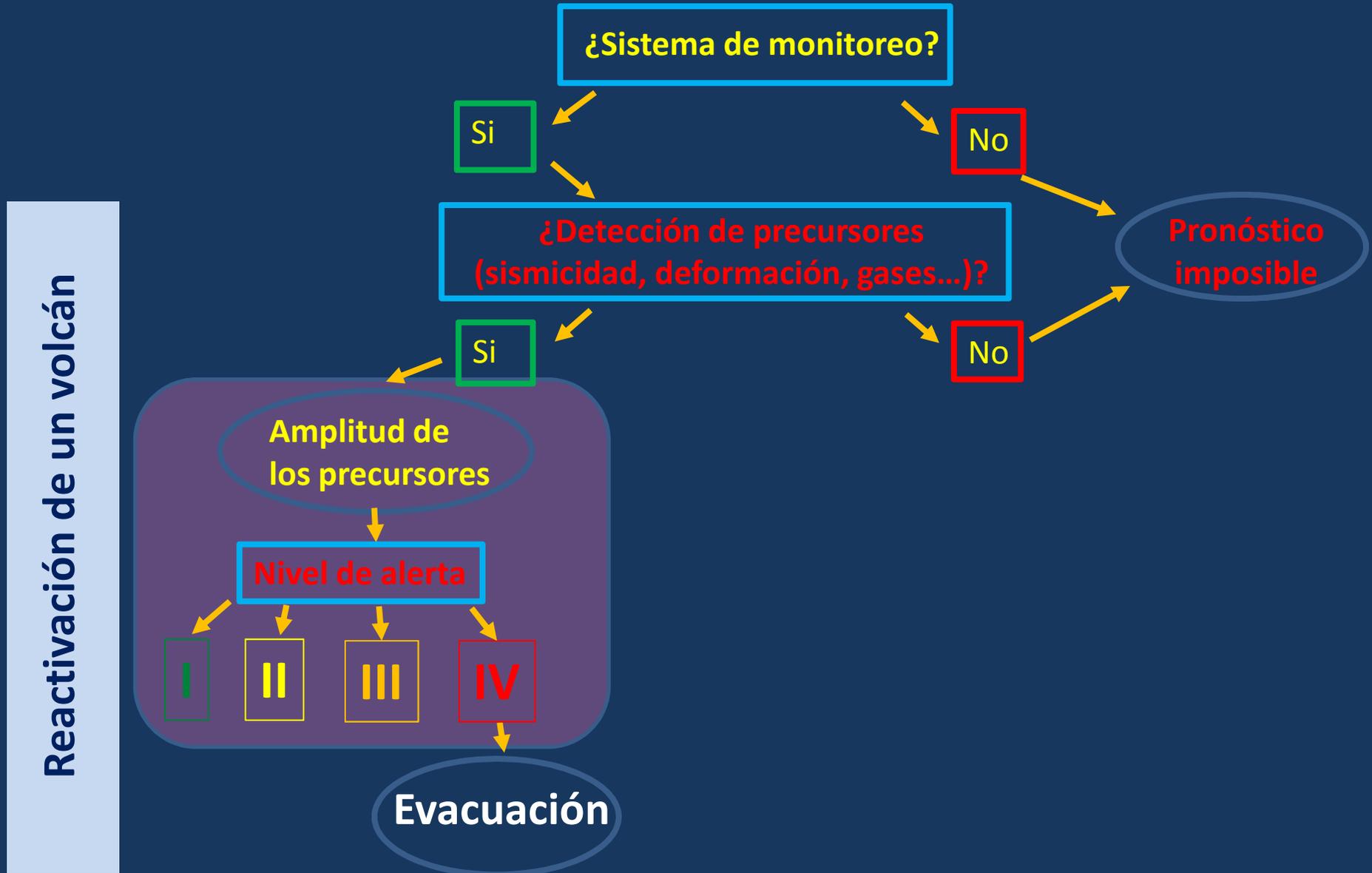
# Precursores de erupción

## Deformación

Volcán Hekla, Islandia  
26 Febrero 2000



# El árbol del pronóstico volcánico

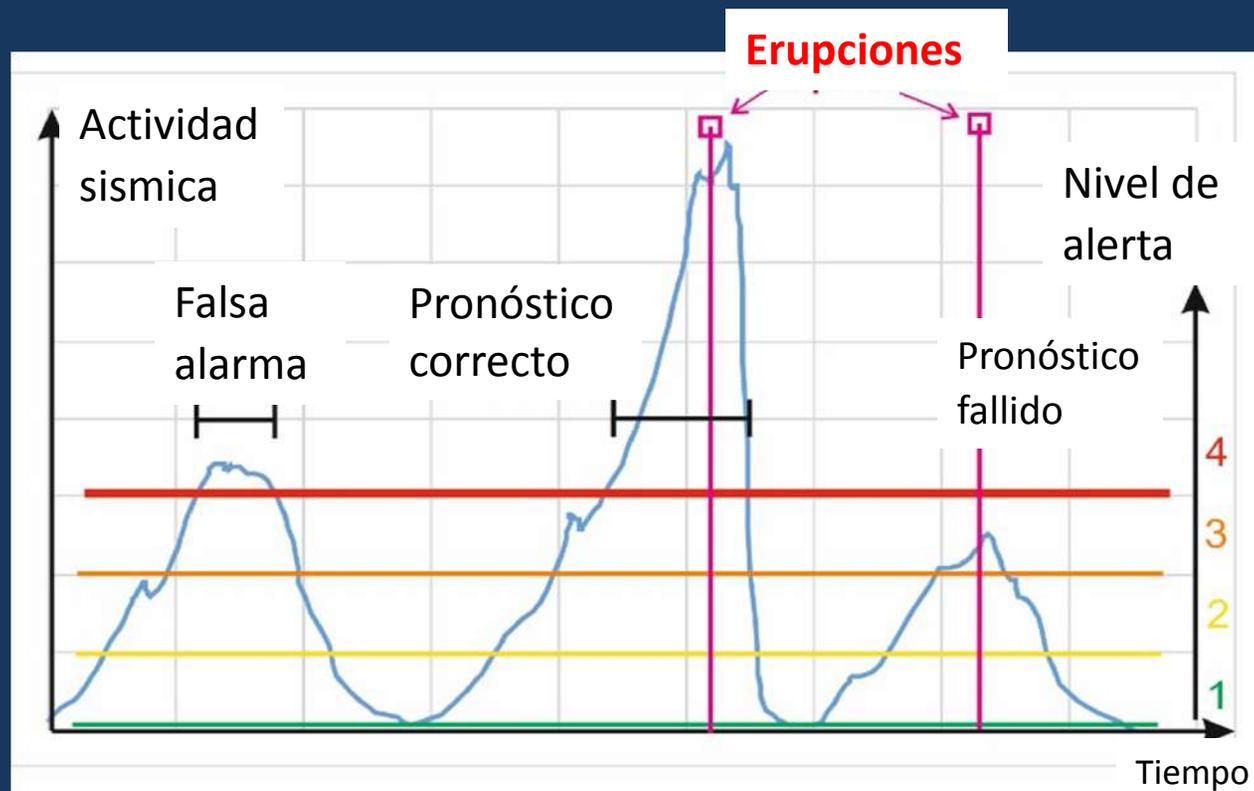


# ¿Cómo definir el nivel de alerta?

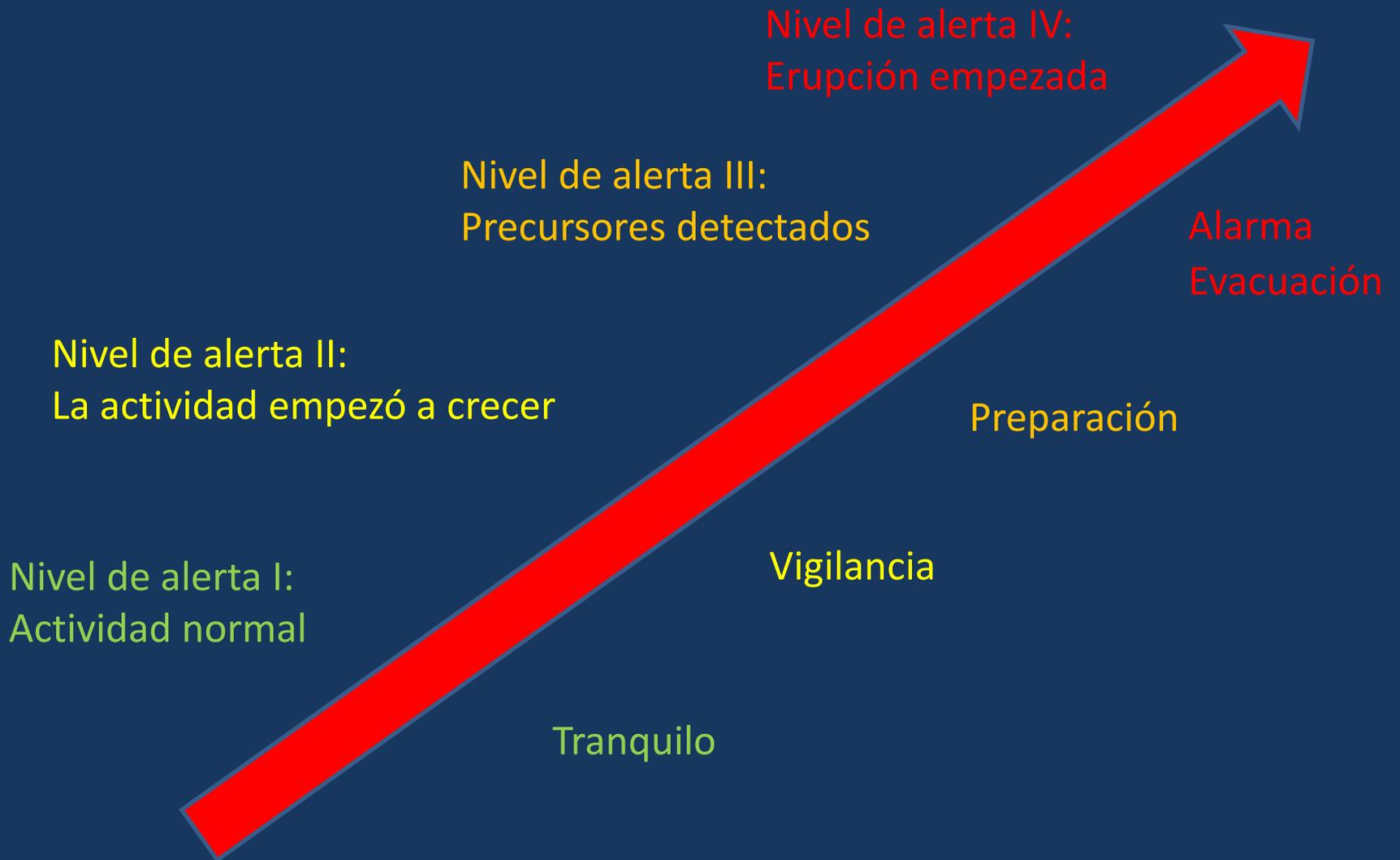
Comparación de la actividad observada con previas crisis del mismo volcán o de volcanes semejantes.

Definición de umbrales para declarar niveles de alerta

Reconocimiento de patrones con combinación de observaciones



# Niveles de alerta (Indonesia)



# SEMÁFORO DE ALERTA VOLCÁNICA



## VERDE

El volcán está inactivo debido a que sus condiciones dinámicas internas son estables. **La población asentada en sus inmediaciones puede desarrollar sus actividades con normalidad.**

## AMARILLO

El volcán incrementa su actividad sísmica y se observa la presencia de fumarolas y posible deformación. Existe la posibilidad de que se produzcan explosiones y emisiones de ceniza. **La población debe estar atenta a las recomendaciones de las autoridades y mantenerse alejada de las zonas de riesgo.**

## NARANJA

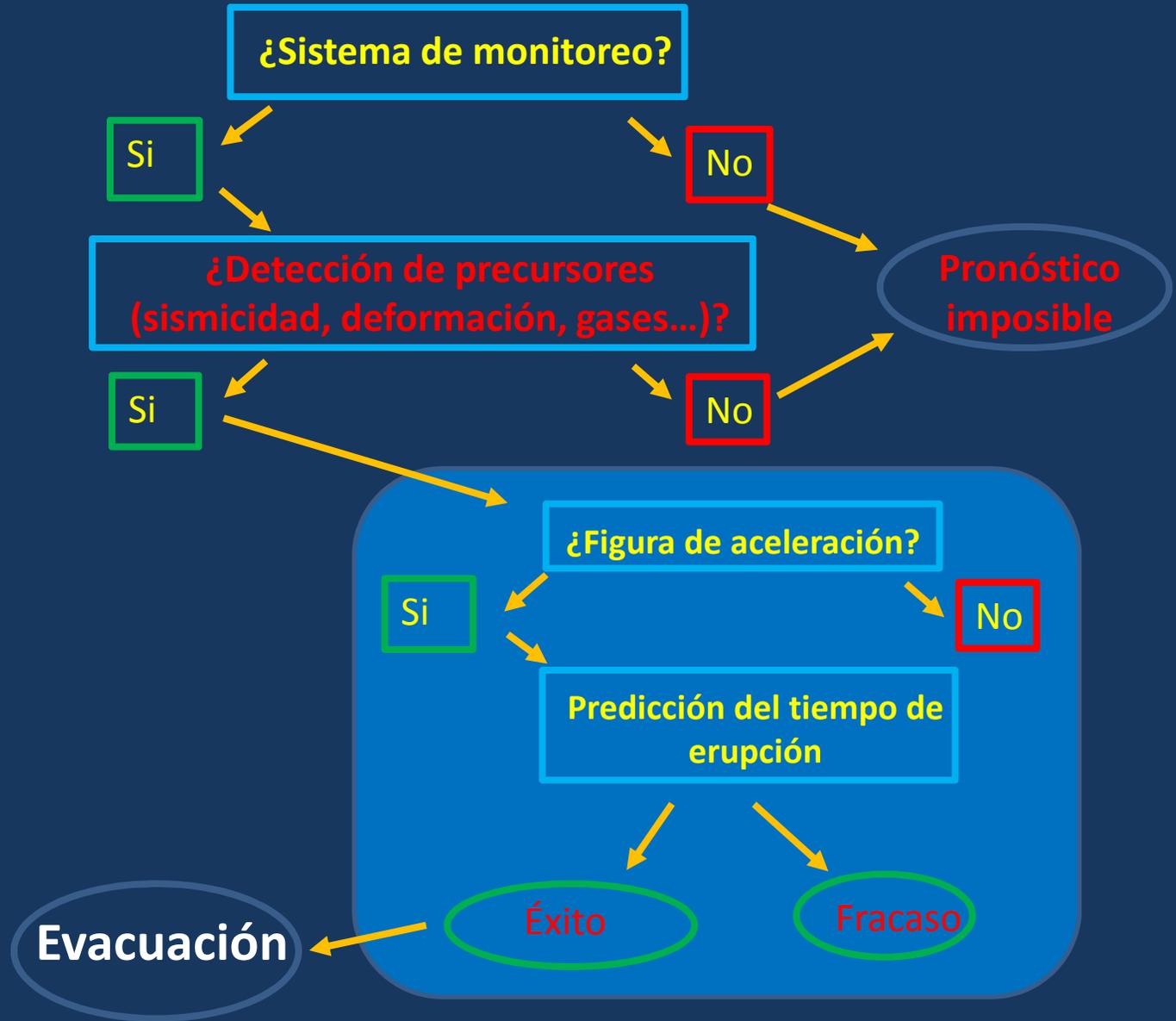
El volcán aumenta de manera significativa su actividad eruptiva. Se observa el incremento de la actividad sísmica, la ocurrencia frecuente de explosiones y la emisión de cenizas y bloques balísticos. **La población debe seguir las recomendaciones de las autoridades y mantenerse alejada del volcán.**

## ROJO

El volcán está en plena erupción crítica con el consecuente riesgo de afectación a la población. La erupción genera grandes columnas de cenizas y la eyección de bloques balísticos. **La población debe estar muy atenta a las indicaciones de las autoridades ante una posible evacuación.**

# El árbol del pronóstico volcánico

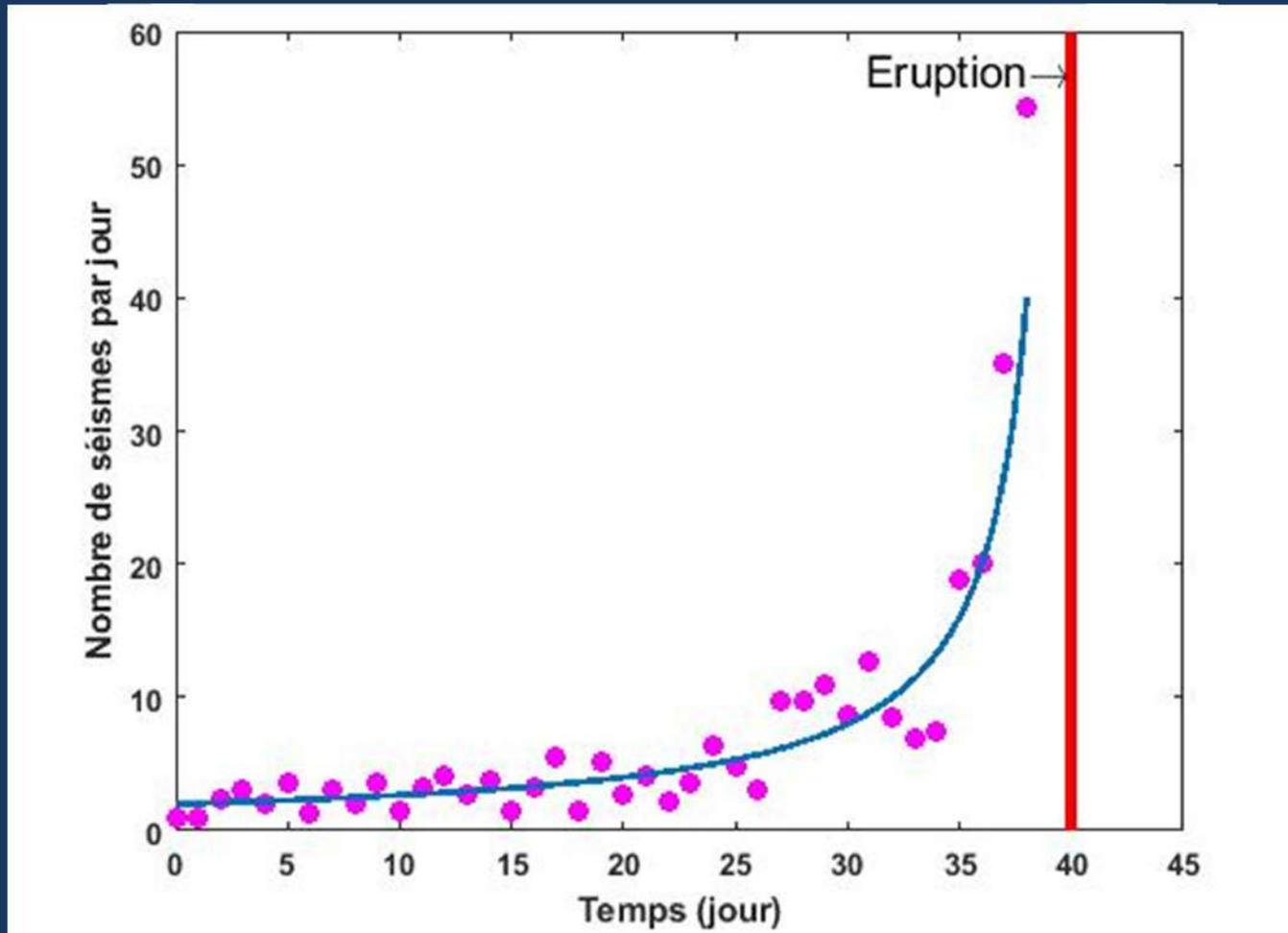
Reactivación de un volcán



# El método de predicción de ruptura de material

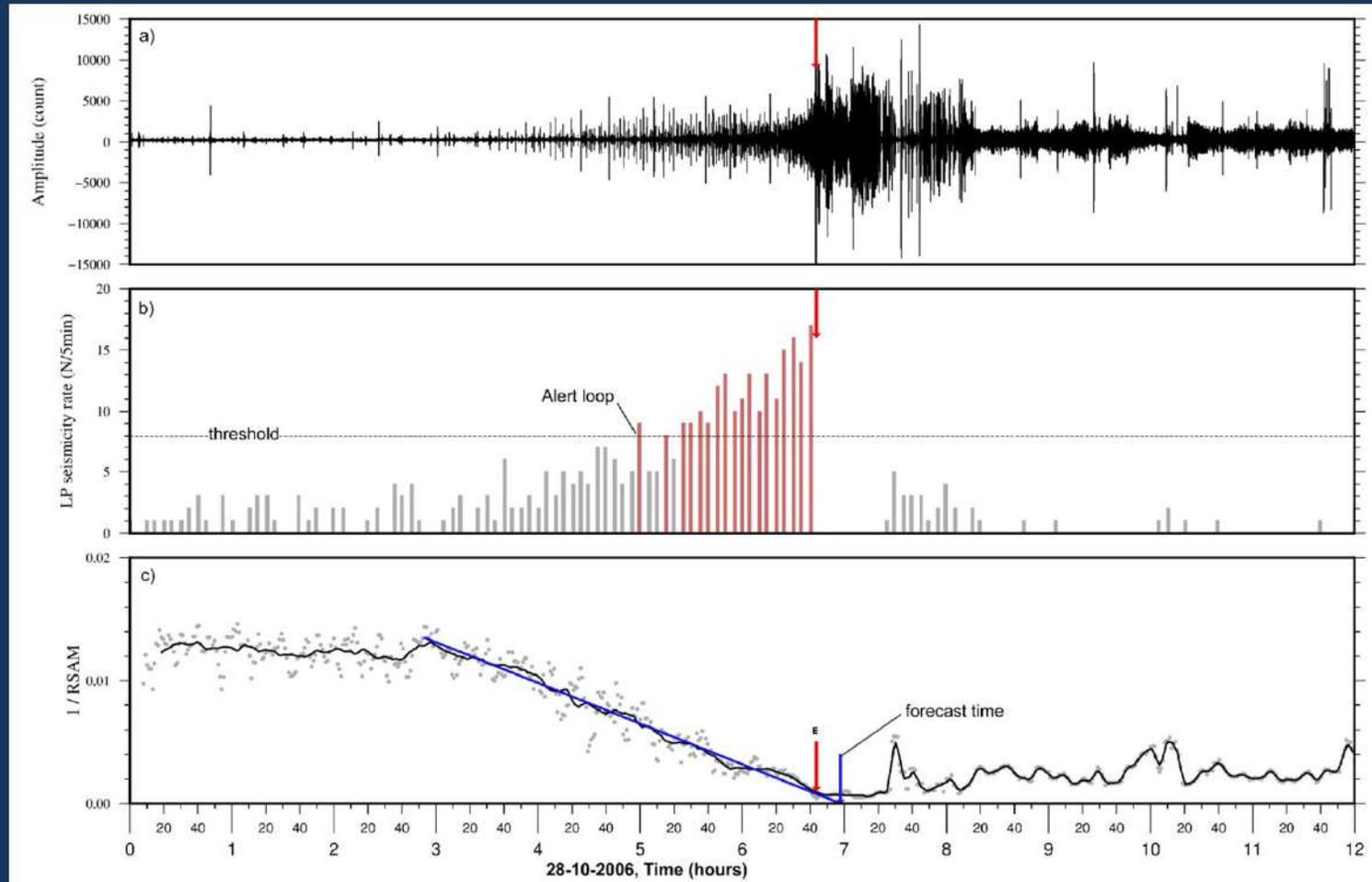
(Material Failure Forecast Method – FFM – Voight, 1988)

Un método determinístico para la predicción del tiempo de inicio de erupción (tema de investigación)



# El método de predicción de ruptura de material

## Volcán Ubinas



1/RSAM

*Machacca et al. (2012)*

# El método de predicción de ruptura de material

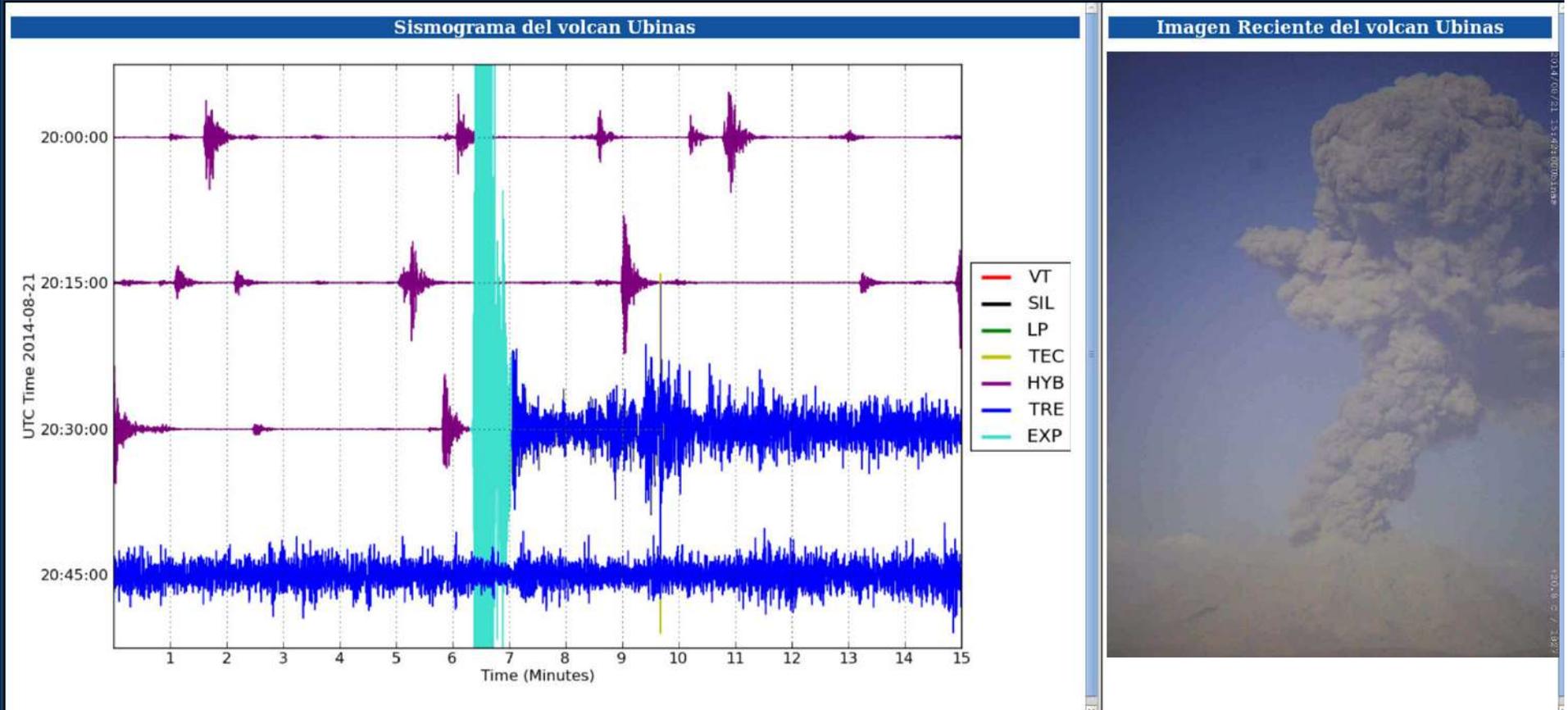
## Nuevo planteamiento bayesiano y en tiempo real del FFM

- Clasificación y conteo automático de eventos sísmicos
- Ajuste de curva posible en tiempo real
- Estimación de incertidumbre, criterios de calidad

*Boué et al. (2015)*

# Reconocimiento automática de eventos sísmicos (machine learning)

## Volcán Ubinas



Una nueva herramienta para los observatorios

# Estimación de la tasa de éxito del método FFM

## Piton de la Fournaise

2000 – 2010

Eventos volcano-tectonicos

30 erupciones efusivas



## Volcán de Colima

1998 – 2011

Eventos de periodo largo

36 Erupciones vulcanianas



## Volcán Merapi

2010

VT, LP, híbridos

Erupción sub-pliniana



**Total:**

**23 años de registro continuo**

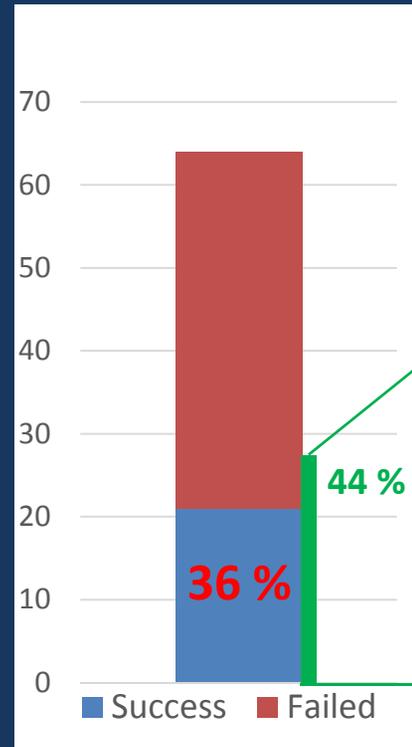
**64 secuencias pre-eruptivas**

*Boué et al. (2015, 2016)*

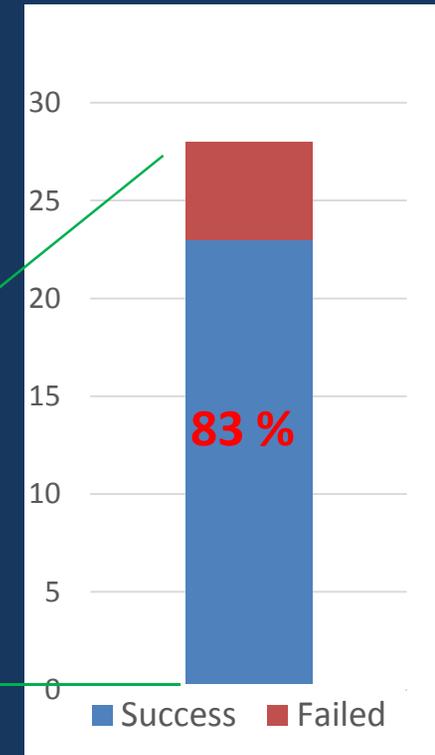
## Resultados

- Pronóstico exitoso para 36% de los casos
- Cuando se cumplen los criterios de fiabilidad, 83% de éxito

Tasa de éxito



Tasa de éxito con criterios de fiabilidad



Boué et al., 2016

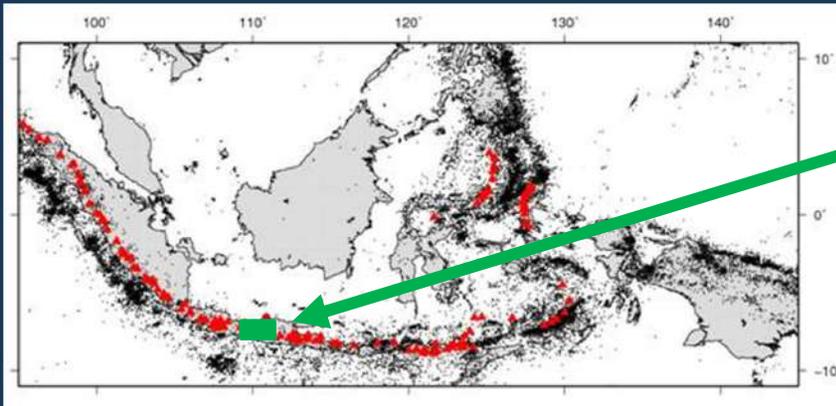
Necesidad de ampliar este estudio y de comprender los fenómenos físicos asociados

➡ Tesis de Roger Machacca...

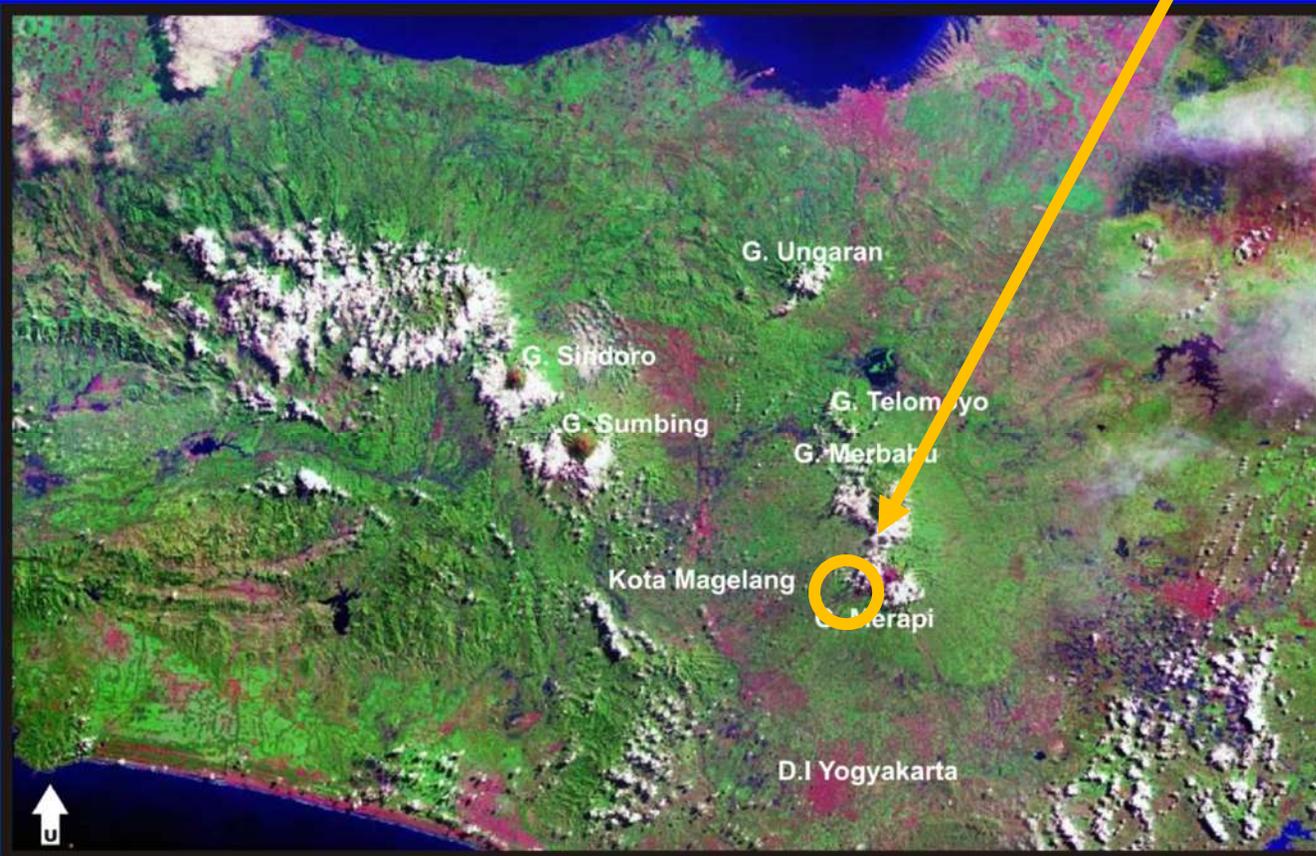
A photograph of a volcanic eruption. A dark, conical volcano is shown in the foreground, with a massive, billowing plume of dark ash and smoke rising from its summit. The plume is dense and textured, with various shades of grey and black. The sky is a pale, overcast blue. The volcano's slopes are dark and appear to be covered in ash or lava rock. The overall scene is dramatic and powerful.

# La erupción de 2010 del volcán Merapi, Indonesia

Historia de un exitoso manejo de crisis volcánica



**Gunung Merapi, Isla de Java  
25 km al norte de la ciudad  
de Yogyakarta**

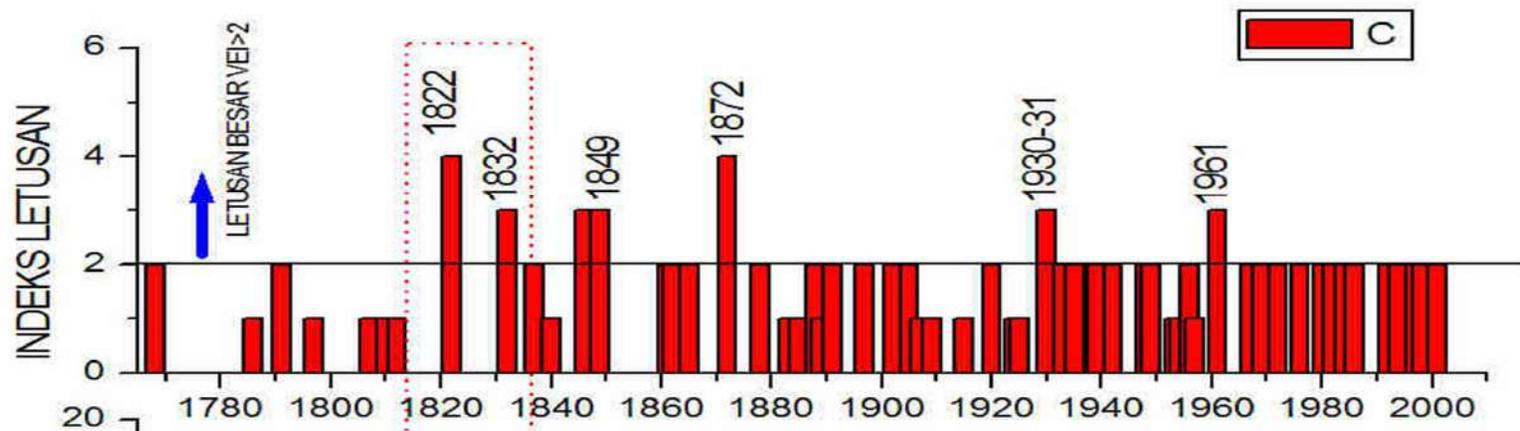


## Numerosos pueblos en las faldas del volcán



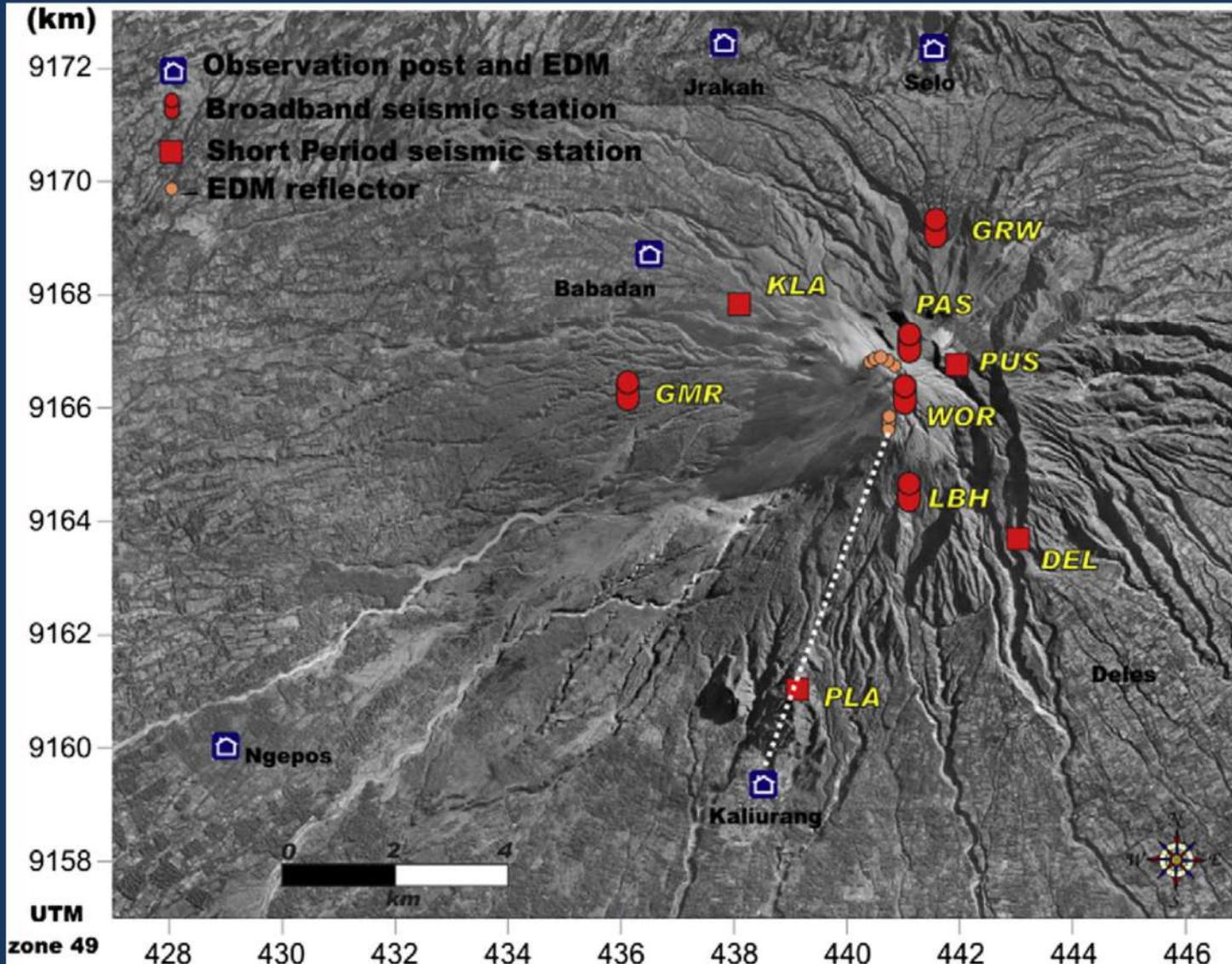
# Historia eruptiva del MERAPI

- 80 erupciones desde 1768. Principales en 1768, 1822, 1849, 1872 et 1930-1931.
- En las últimas décadas, una erupción moderada cada 3 a 5 años (1992, 1994, 1997, 2001, 2006).
- Extrusión de domo de lava, destrucción del domo, flujos piroclásticos (< 5 km).



**Índice de explosividad de las erupciones históricas**

# Red de monitoreo del Merapi en 2010



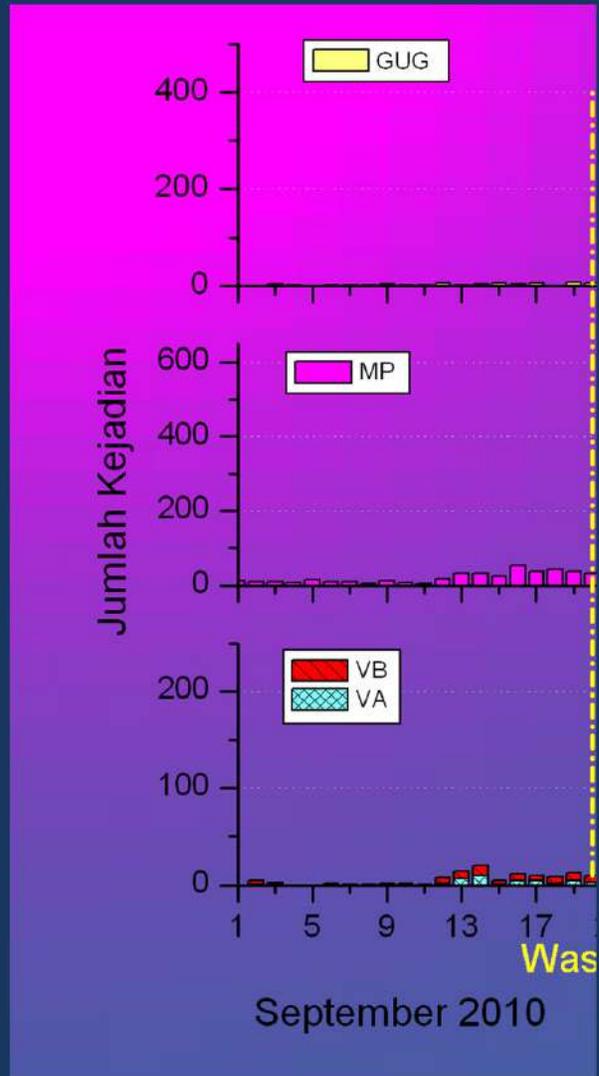
**18 Septiembre de 2010, Chambéry, Francia**



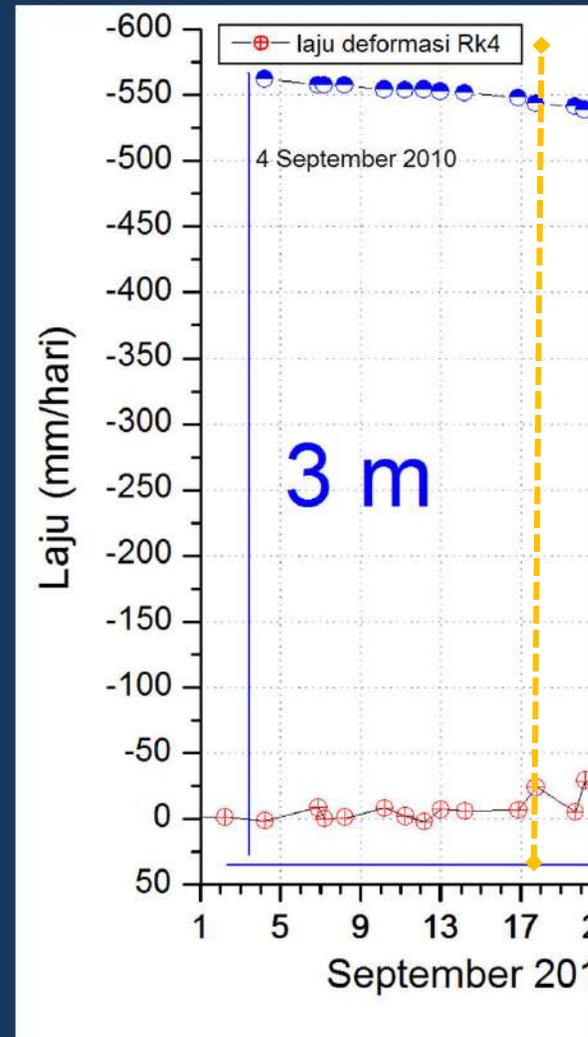
**Dr Surono, director del Centro para la Reducción de los Riesgos Volcánicos y Geológicos, Indonesia (CVGHM)**

# 20 Septiembre, CVGHM, Yogyakarta

## Actividad sísmica



## Deformación



# 20 Septiembre, CVGHM, Yogyakarta

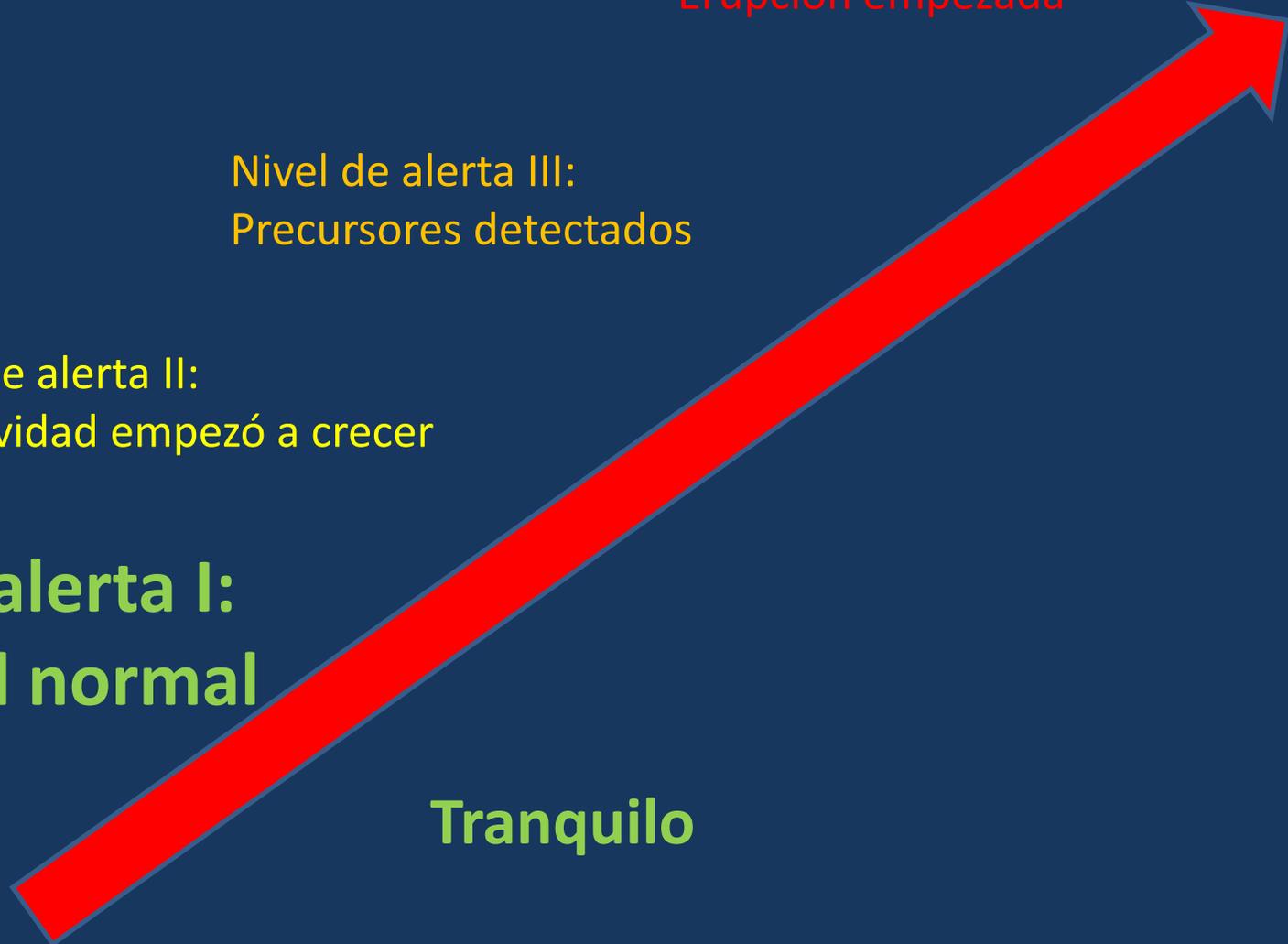
Nivel de alerta IV:  
Erupción empezada

Nivel de alerta III:  
Precursores detectados

Nivel de alerta II:  
La actividad empezó a crecer

Nivel de alerta I:  
Actividad normal

Tranquilo



20 Septiembre, CVGHM, Yogyakarta

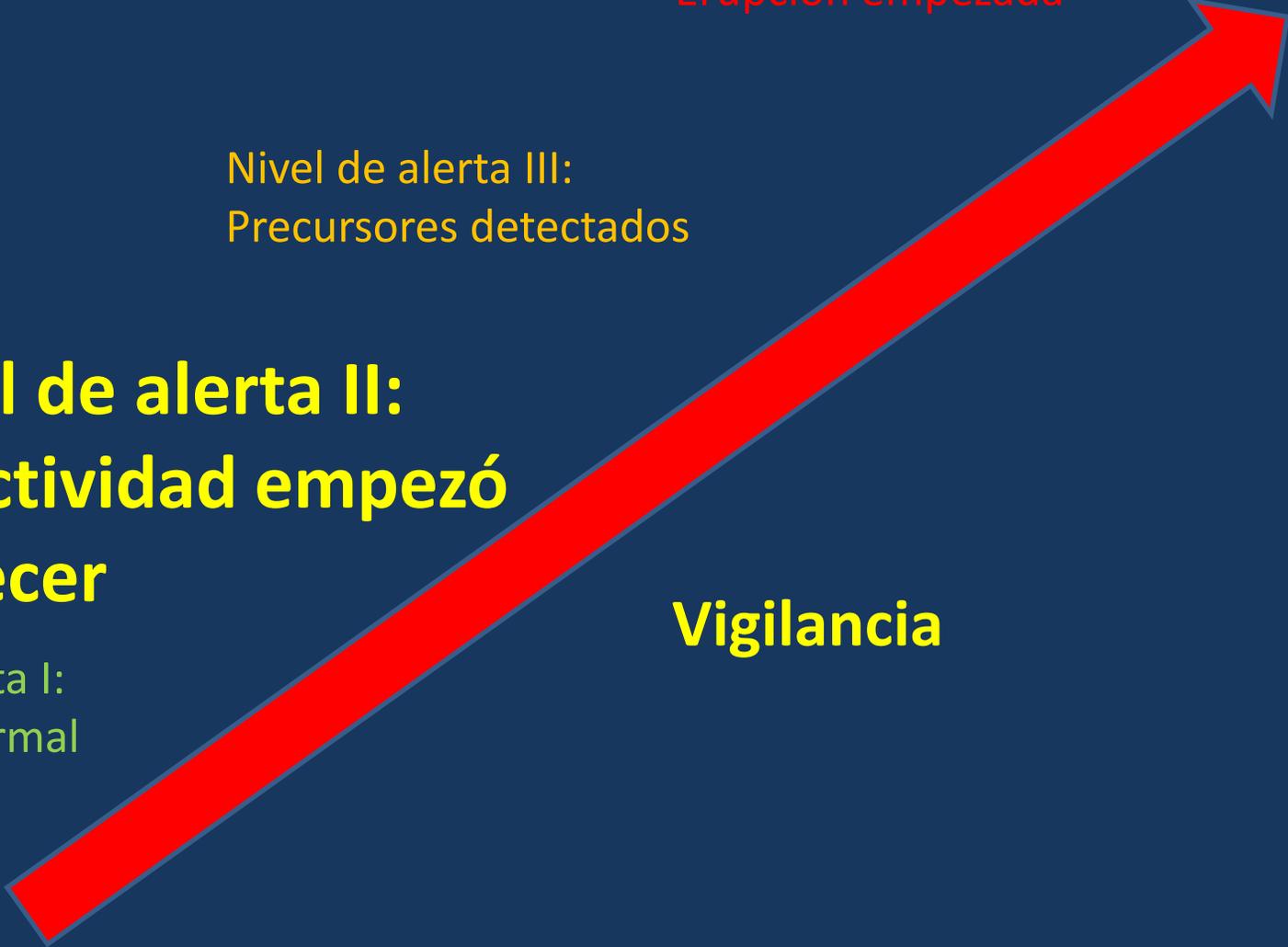
Nivel de alerta IV:  
Erupción empezada

Nivel de alerta III:  
Precursores detectados

**Nivel de alerta II:  
La actividad empezó  
a crecer**

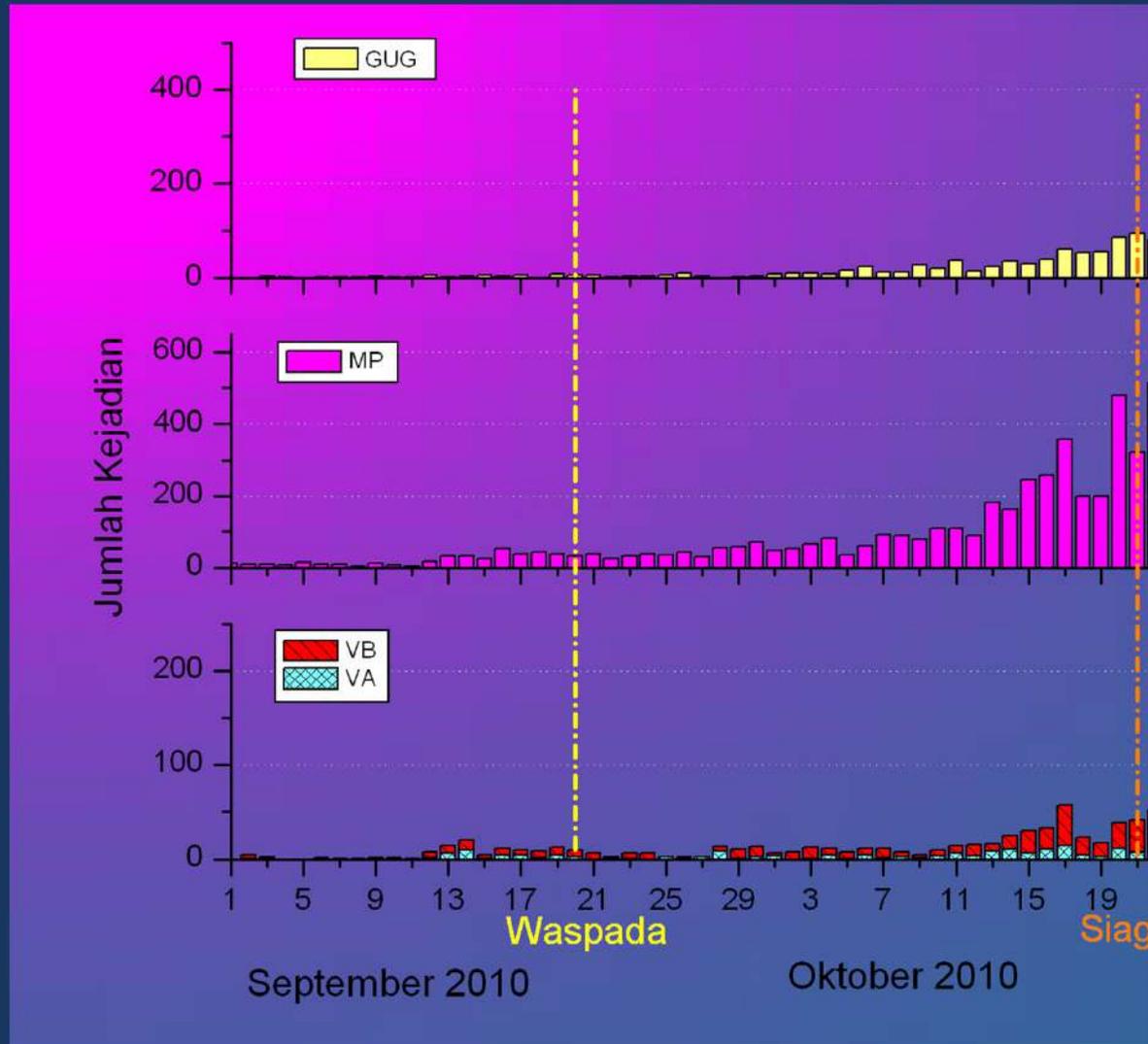
Nivel de alerta I:  
Actividad normal

**Vigilancia**



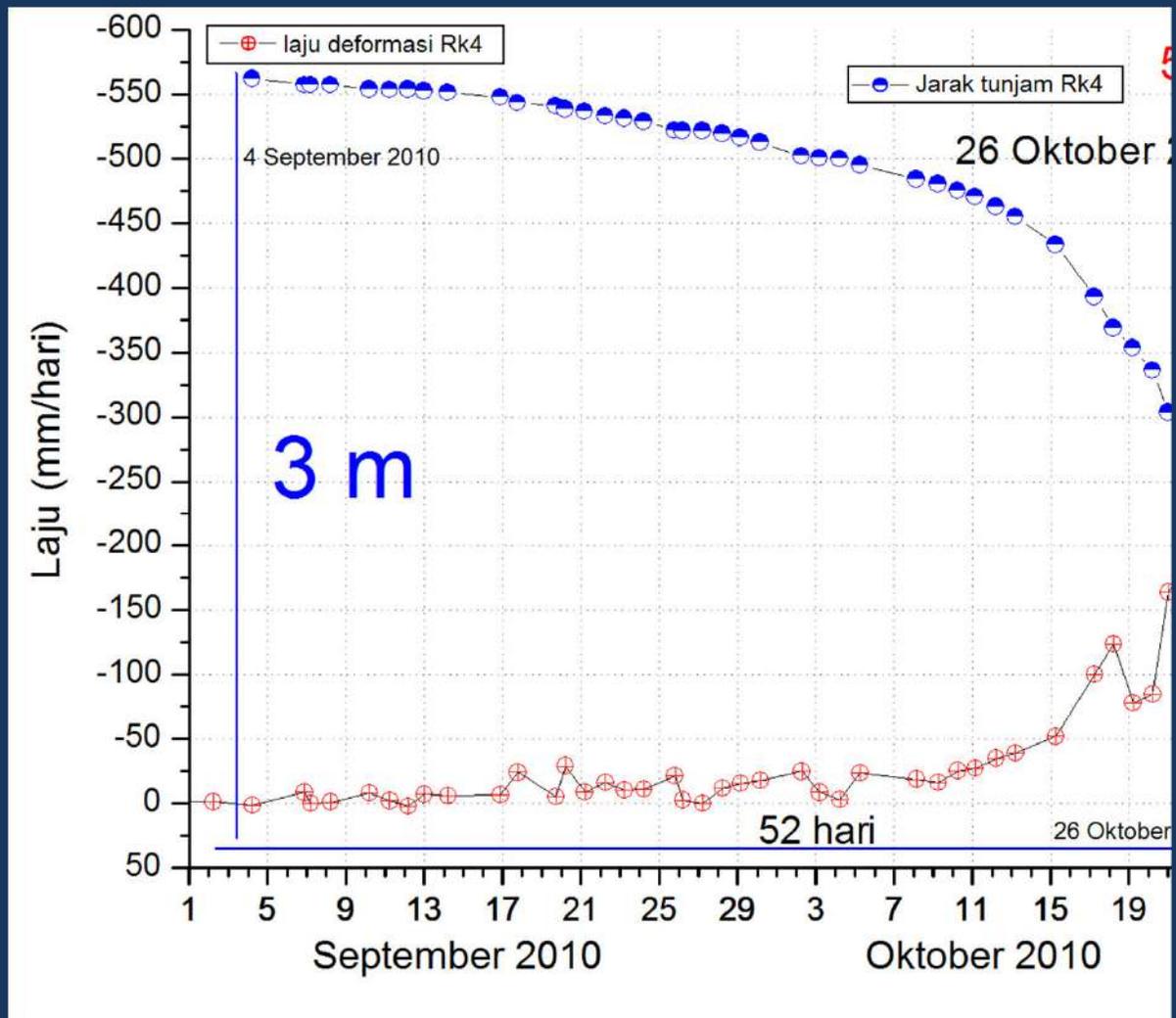
21 Octubre, CVGHM, Yogyakarta

## Actividad sísmica



21 Octubre, CVGHM, Yogyakarta

## Deformación



21 Octubre, CVGHM, Yogyakarta

Nivel de alerta IV:  
Erupción empezada

Nivel de alerta III:  
Precursores detectados

**Nivel de alerta II:  
La actividad empezó  
a crecer**

Nivel de alerta I:  
Actividad normal

**Vigilancia**



21 Octubre, CVGHM, Yogyakarta

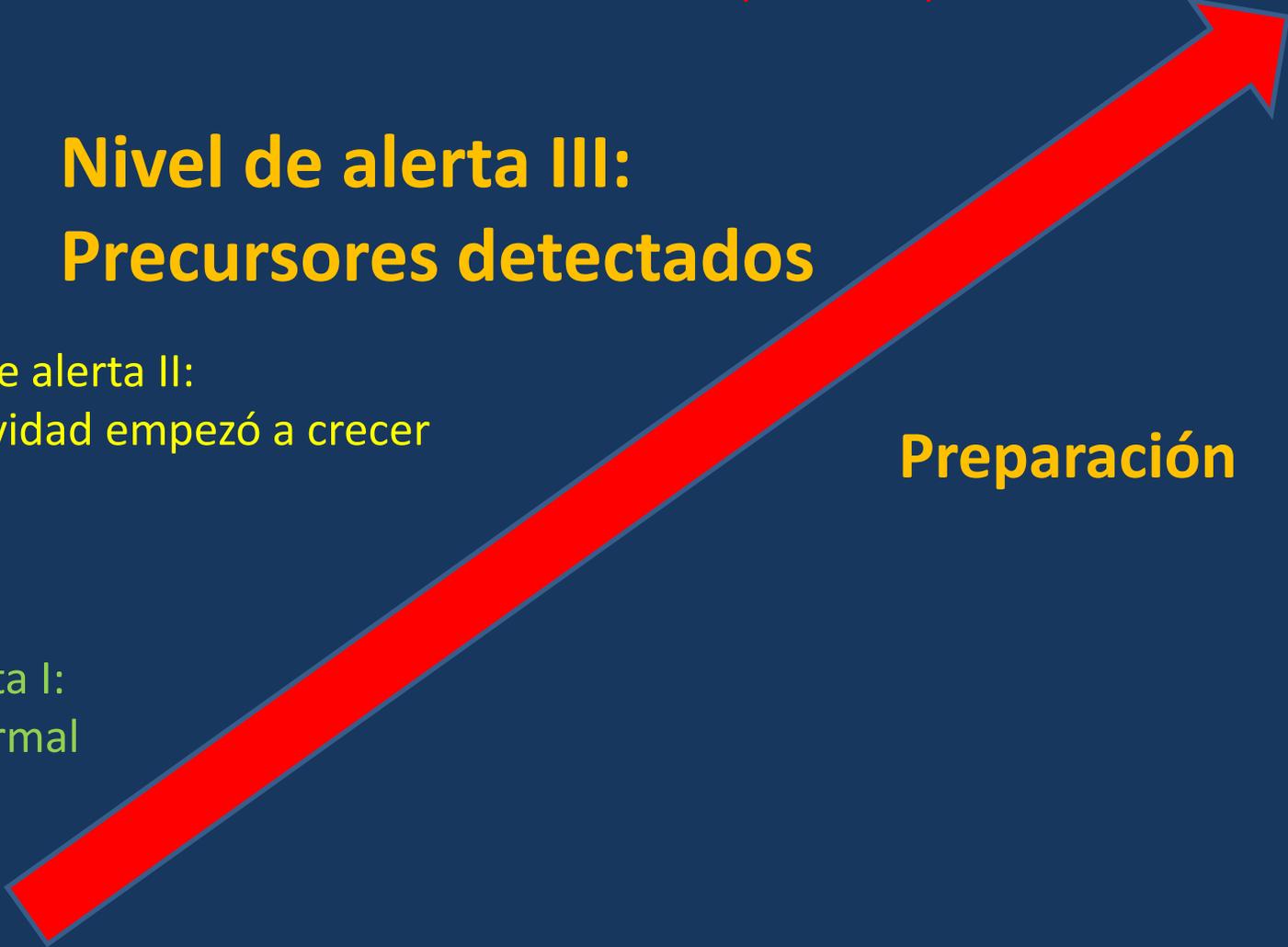
Nivel de alerta IV:  
Erupción empezada

**Nivel de alerta III:  
Precursores detectados**

Nivel de alerta II:  
La actividad empezó a crecer

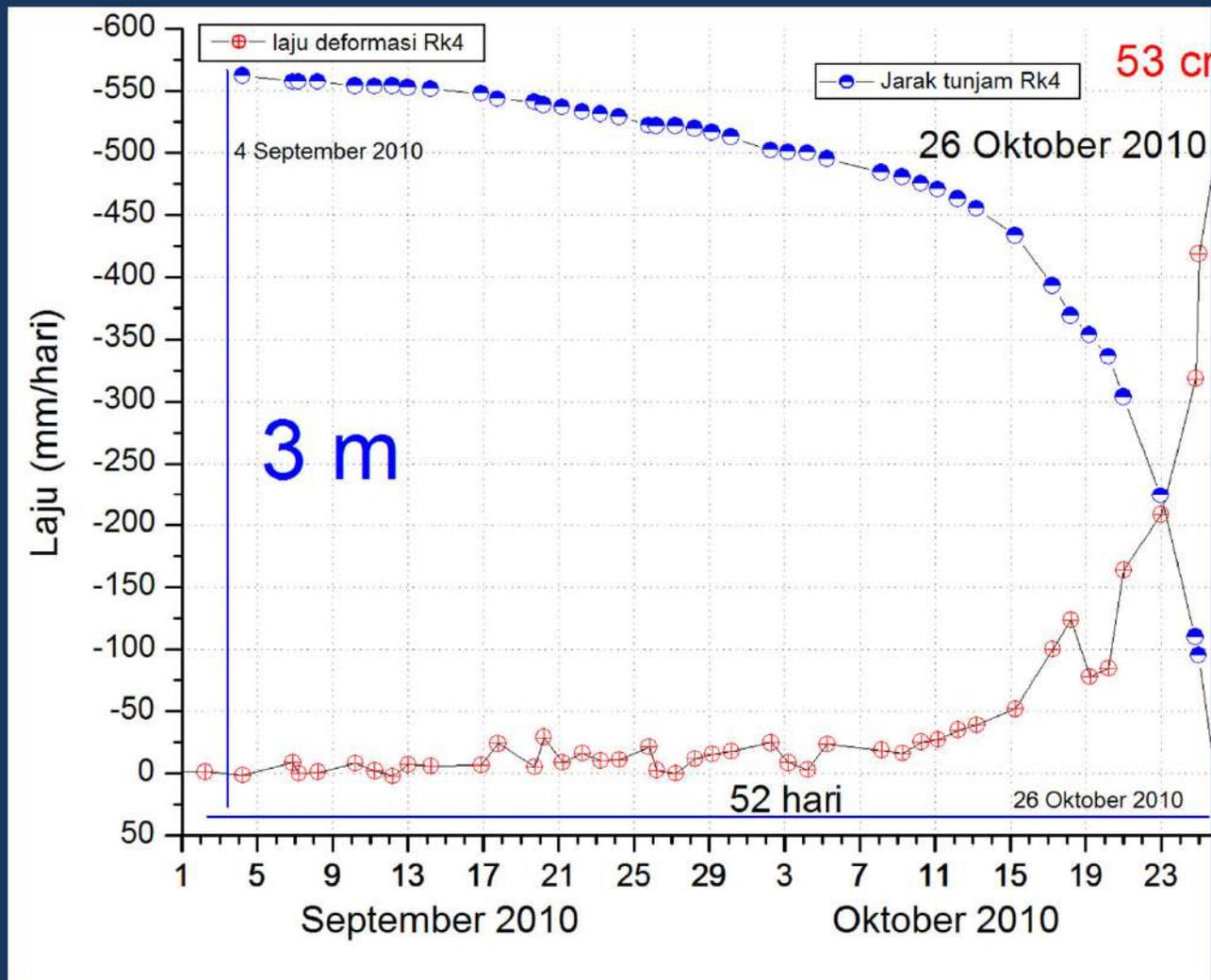
Nivel de alerta I:  
Actividad normal

**Preparación**



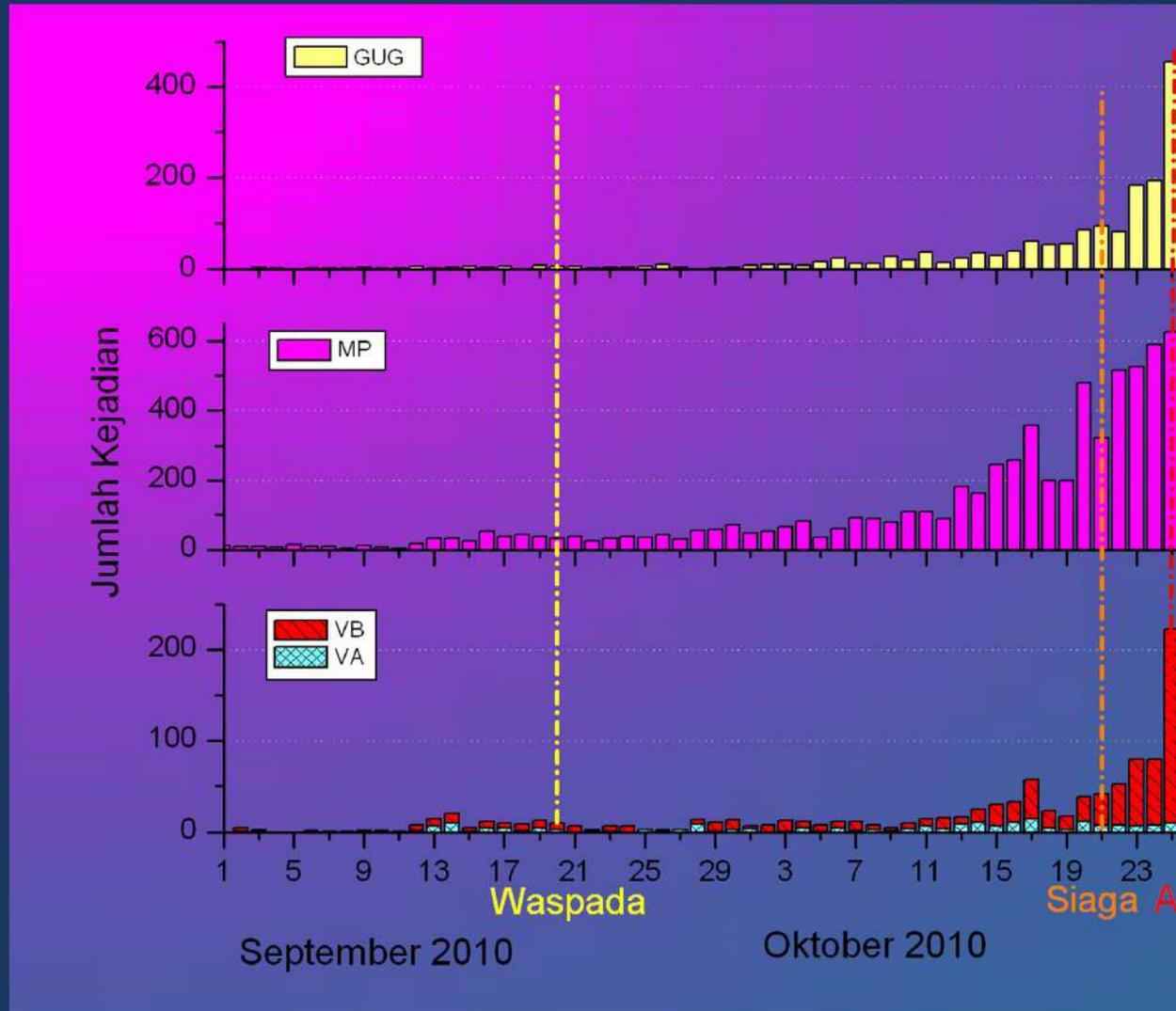
# 25 Octubre 06:00, CVGHM, Yogyakarta

## Deformación



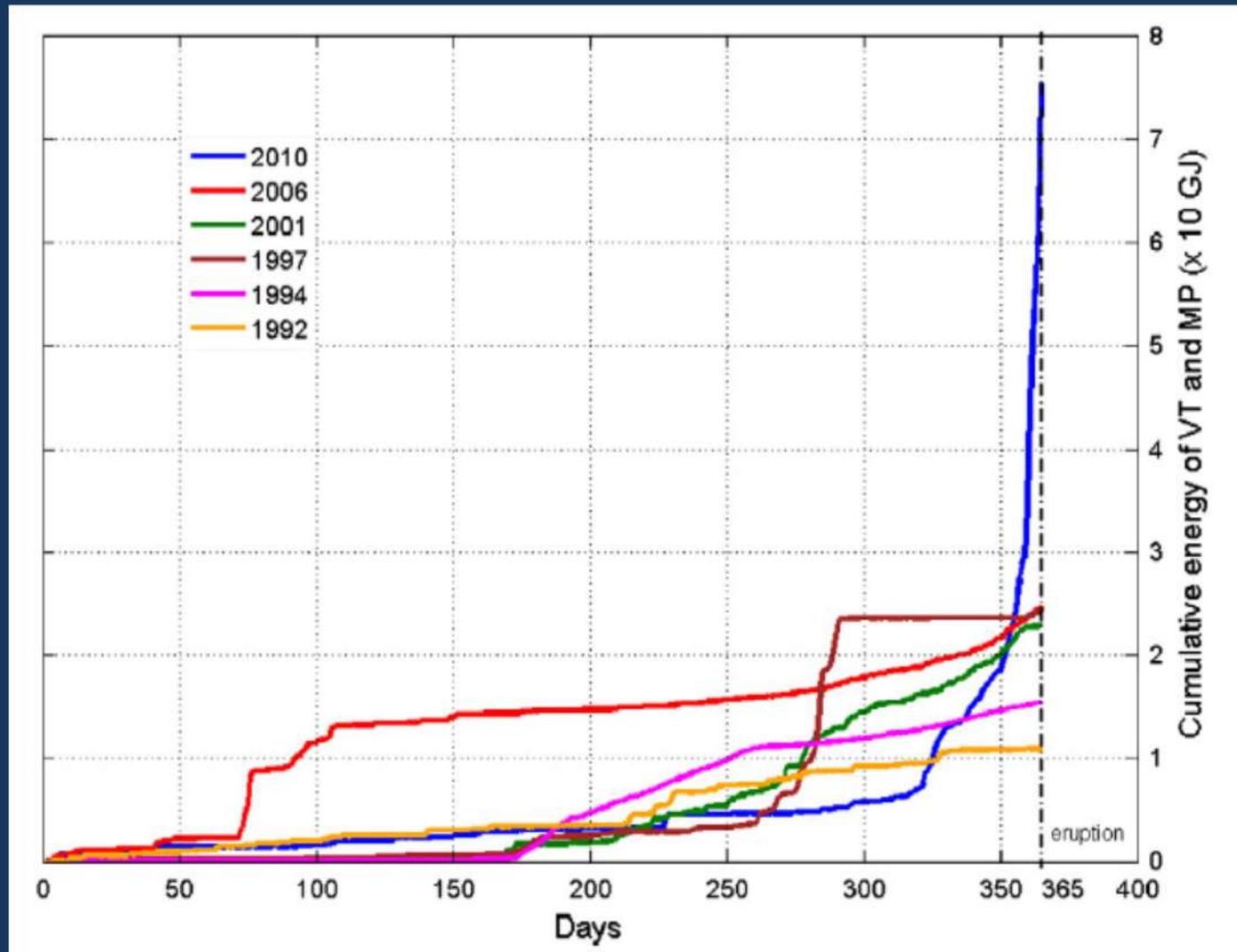
25 Octubre 06:00, CVGHM, Yogyakarta

## Actividad sísmica



25 Octubre 06:00, CVGHM, Yogyakarta

## Energía sísmica acumulada



25 Octubre 06:00 TL, CVGHM, Yogyakarta

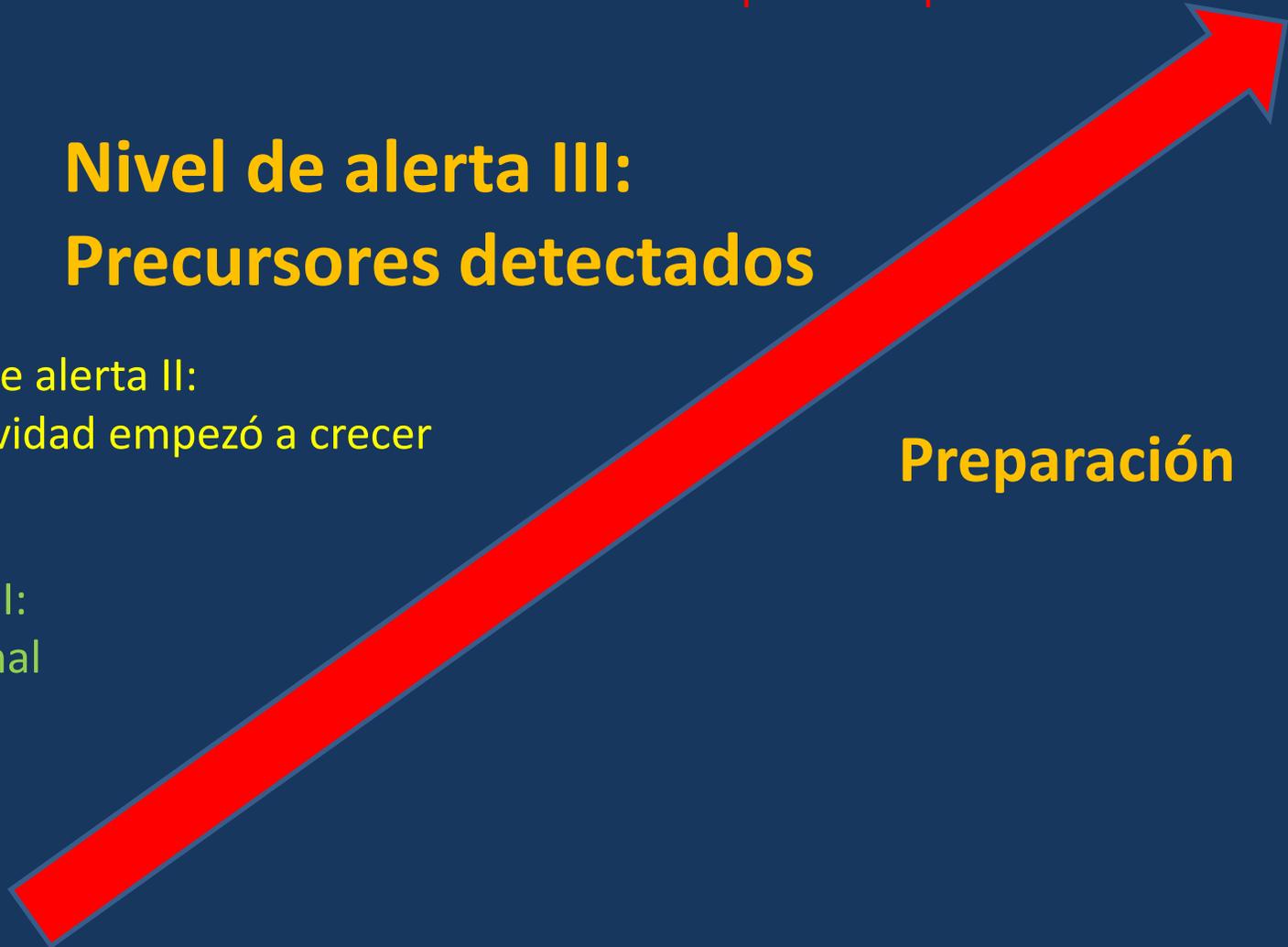
Nivel de alerta IV:  
Erupción empezada

**Nivel de alerta III:  
Precursores detectados**

Nivel de alerta II:  
La actividad empezó a crecer

**Preparación**

Nivel de alerta I:  
Actividad normal



25 Octubre 06:00 TL, CVGHM, Yogyakarta



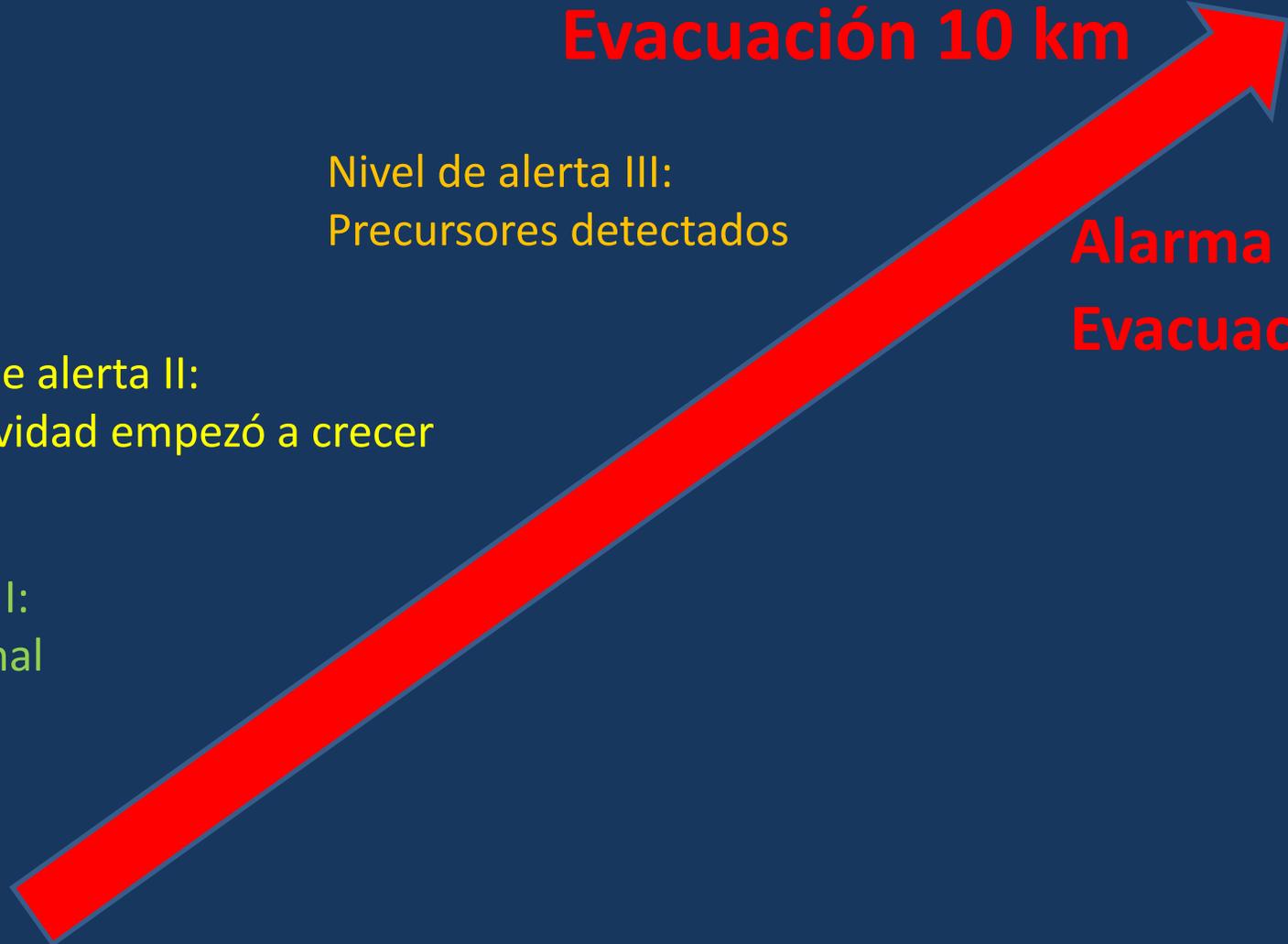
**Nivel de alerta IV:  
Evacuación 10 km**

Nivel de alerta III:  
Precursores detectados

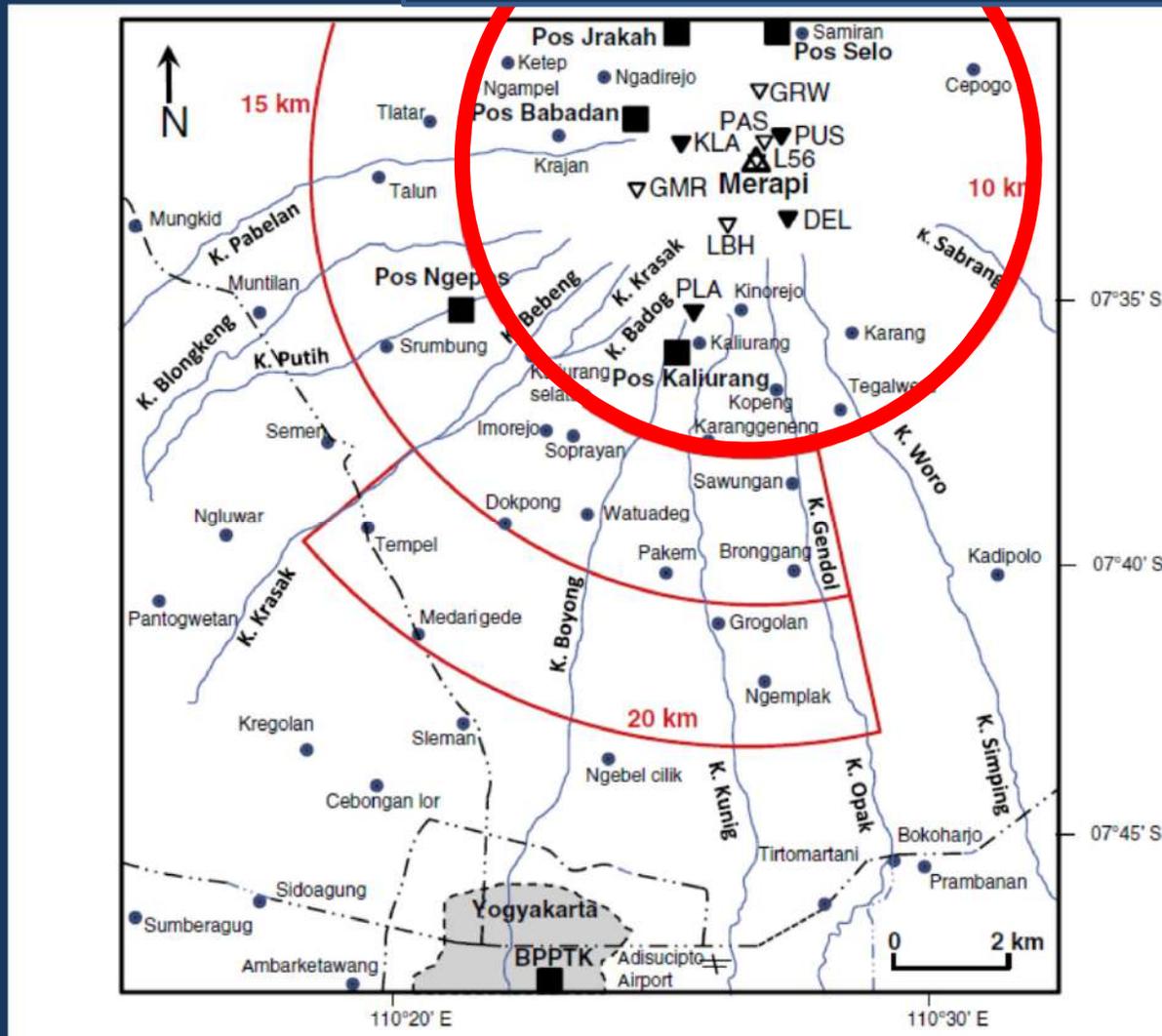
Nivel de alerta II:  
La actividad empezó a crecer

Nivel de alerta I:  
Actividad normal

**Alarma  
Evacuación**



25 Octubre 06:00 TL



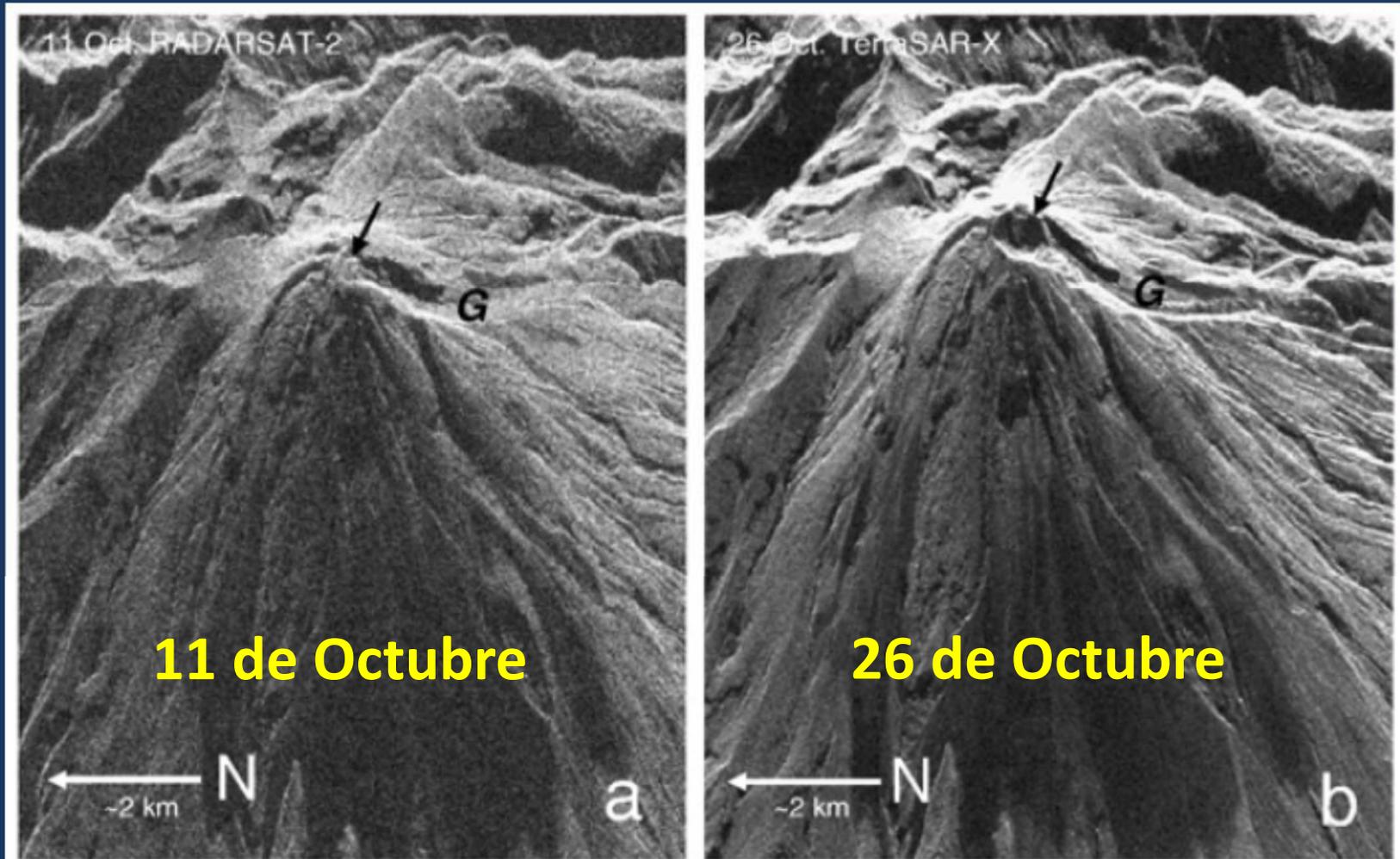
Zona de evacuación: 10 km del cráter

**26 Octubre 16:00 TL, Merapi**



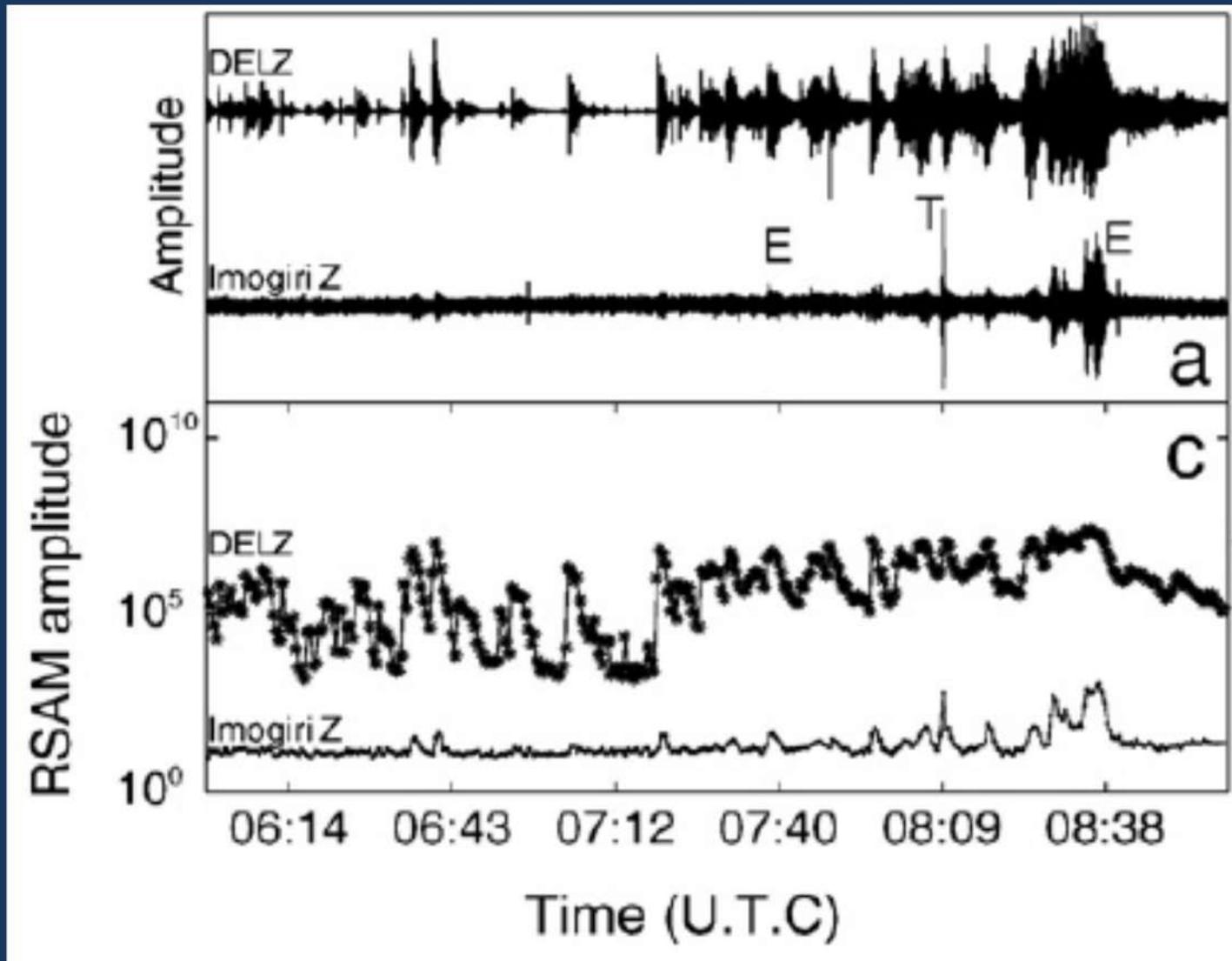
# Cambios en la cima del volcán

## Comparación de imágenes radar



3 Noviembre, Merapi

Serie de explosiones más fuertes



3 Noviembre 09:00 TL, CVGHM, Yogyakarta



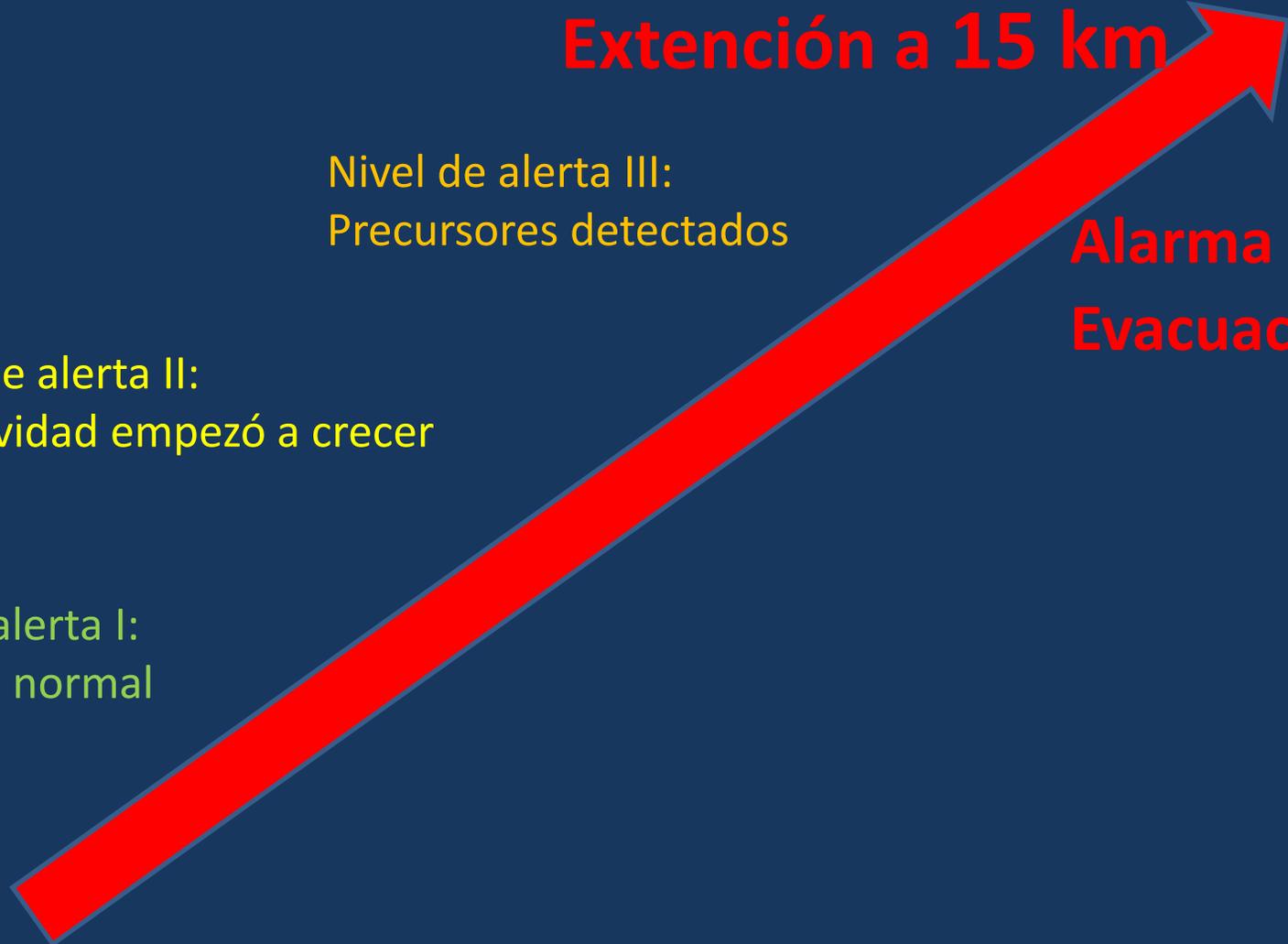
**Nivel de alerta IV:  
Extención a 15 km**

Nivel de alerta III:  
Precursores detectados

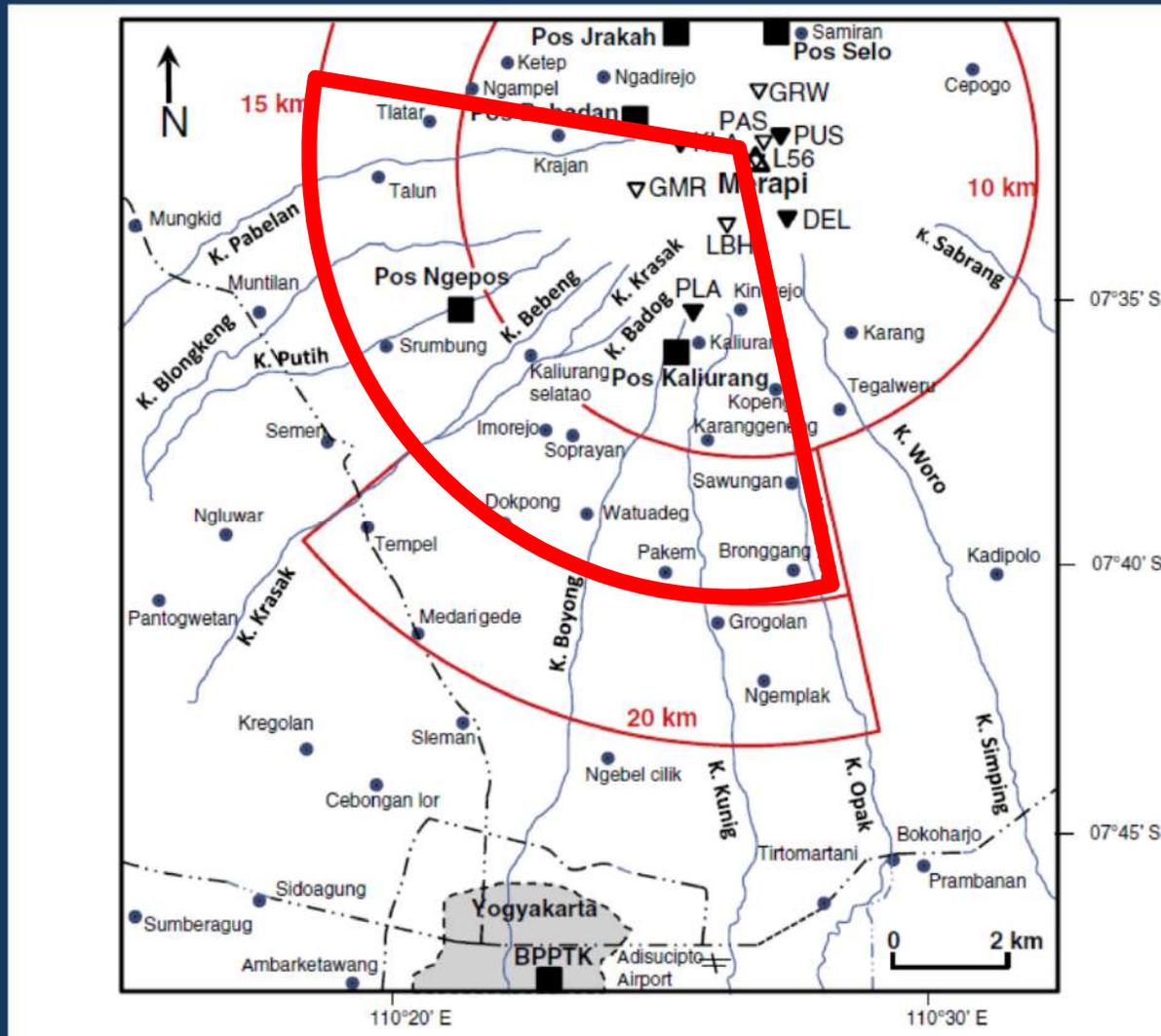
Nivel de alerta II:  
La actividad empezó a crecer

Nivel de alerta I:  
Actividad normal

**Alarma  
Evacuación**



3 Noviembre 09:00 TL



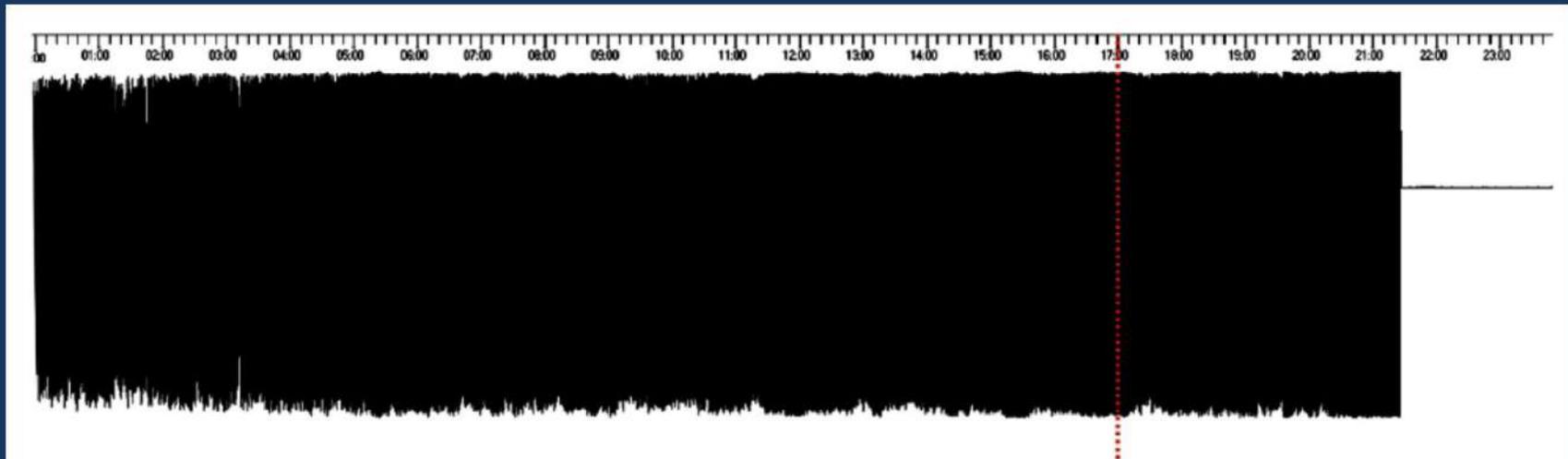
Zona de evacuación: 15 km del cráter

3 Novembre



4 Noviembre, Merapi

## Estaciones sísmicas saturadas



4 Noviembre 18:00 TL, CVGHM, Yogyakarta



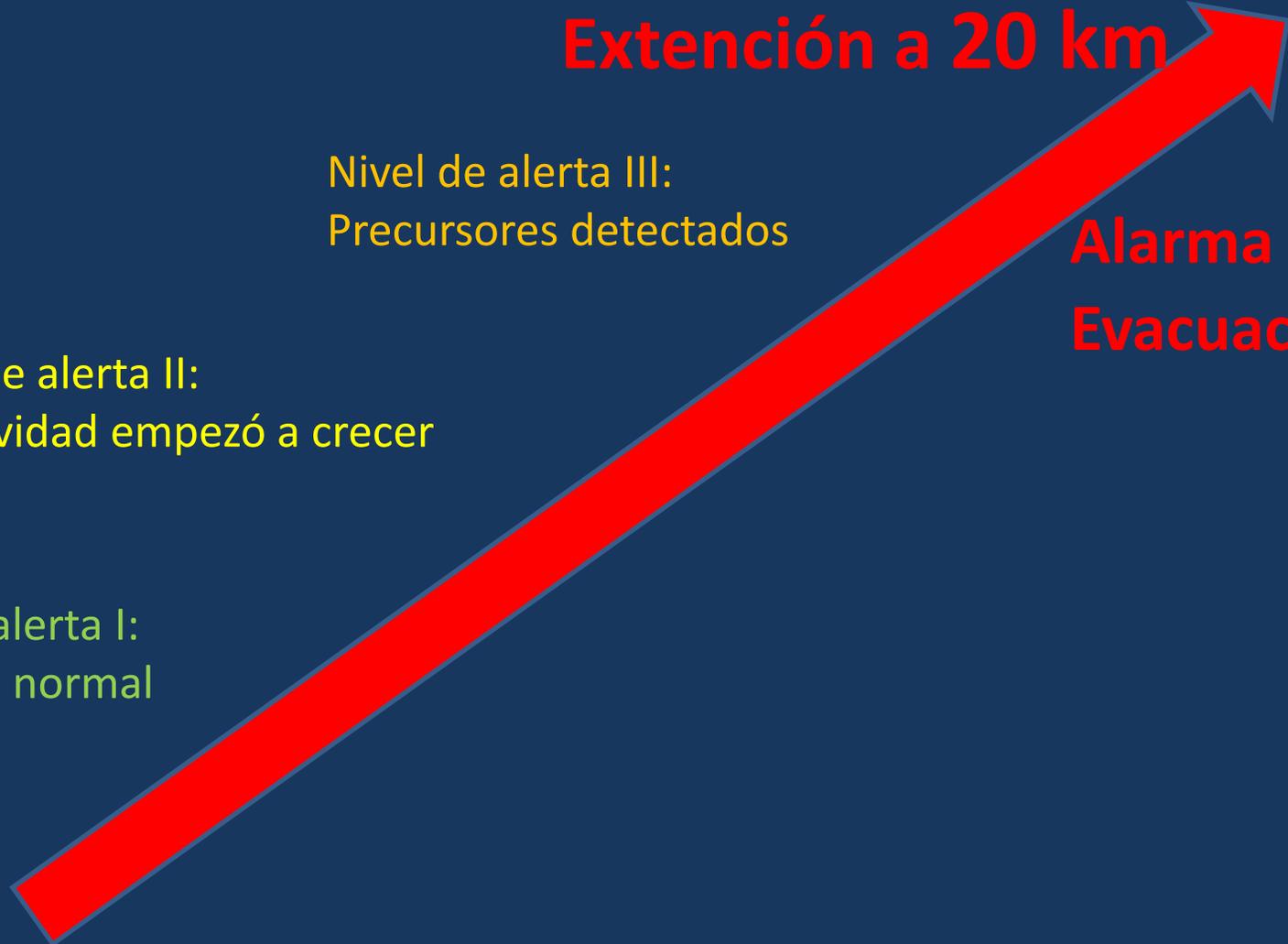
**Nivel de alerta IV:  
Extención a 20 km**

Nivel de alerta III:  
Precursores detectados

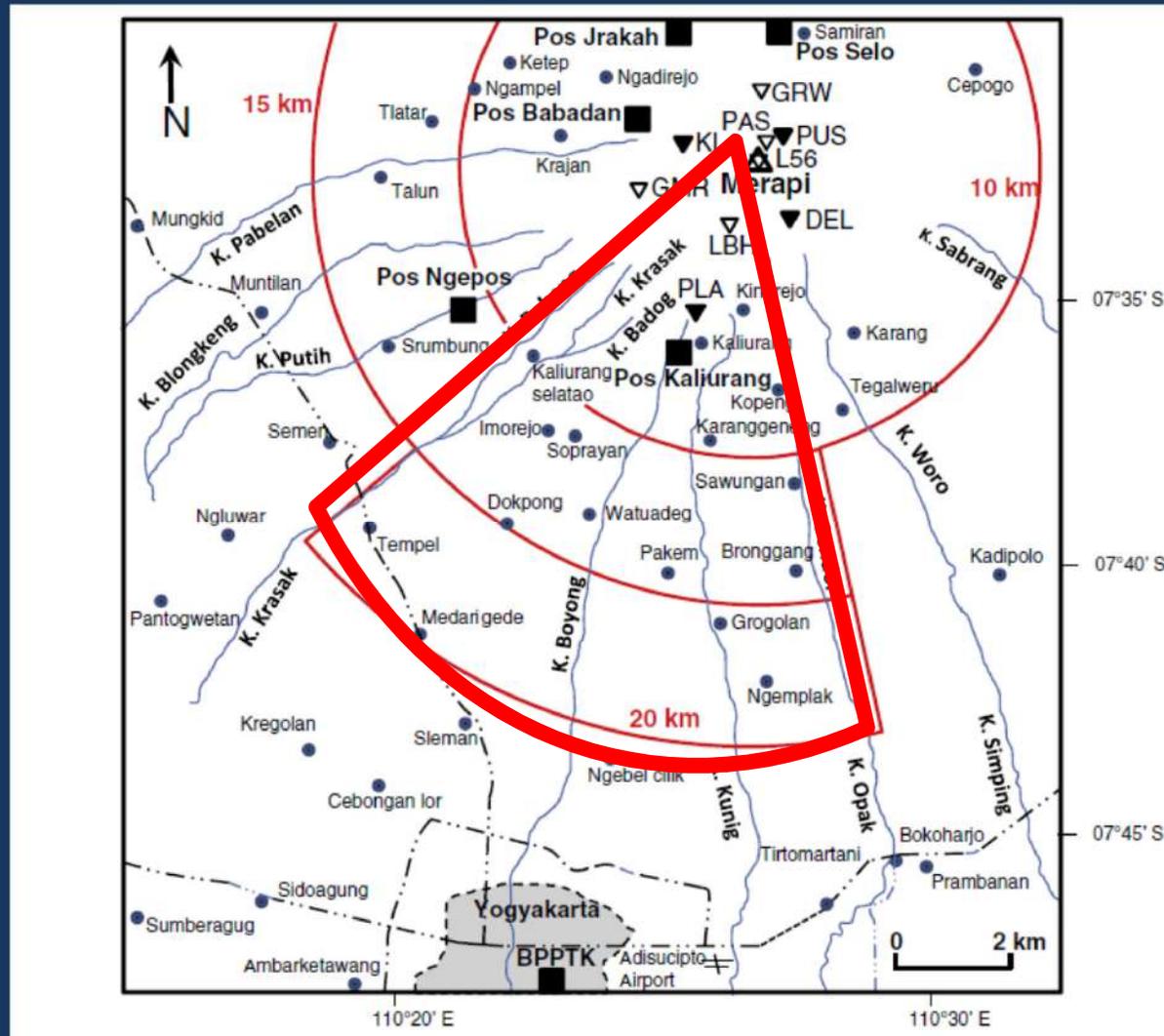
Nivel de alerta II:  
La actividad empezó a crecer

Nivel de alerta I:  
Actividad normal

**Alarma  
Evacuación**



4 Noviembre 18:00 TL



Zona de evacuación: 20 km del cráter

**4-5 Noviembre**

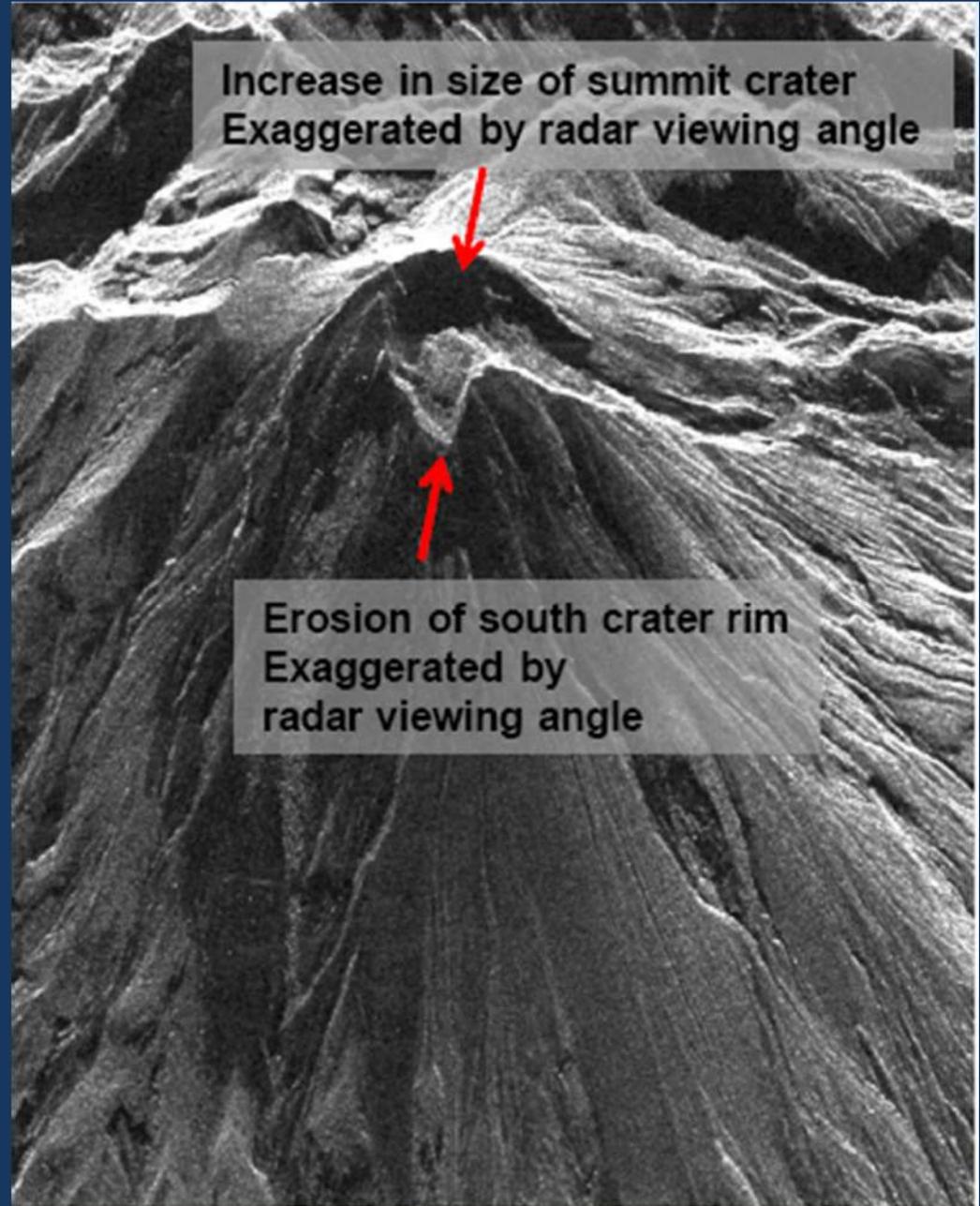
**Erupción mayor**



7 Noviembre, 06:00 TL

Más cambios  
en el cráter

TerraSAR-X



**7 Noviembre, 06:00 TL**



**Extrusión de un domo de lava**

# Antes y después de la crisis



## La mayor evacuación en la historia de la volcanología:

- Más de 410 000 personas evacuadas por las autoridades
- Casi un millón de personas desplazadas



367 personas fallecidas, 277 heridas, 2300 casas destruidas  
**10 000 a 20 000 vidas salvadas**

**Uno de los mayores logros de la volcanología**



## Las condiciones del éxito

- Buen sistema de monitoreo
- Equipo de técnicos y científicos bien capacitados
- Experiencia de muchas erupciones pasadas
- Apoyo con colaboraciones internacionales
- Precursores claros



- Buena comunicación y confianza entre científicos, autoridades y protección civil
- Buena preparación de la sociedad para evacuaciones
- Los habitantes saben qué hacer en caso de emergencia



Dr Surono en conferencia de prensa.

# Conclusiones

**Volcanes = sistemas con comportamiento complejo**

**Antes de una erupción: precursores**

**Pronóstico posible muchas veces**



# Motivos de optimismo

- Grandes avances recientes
- Cada vez más volcanes con sistema de monitoreo
- Progresos científicos y tecnológicos
- Cada erupción nos da más experiencia
- Se puede esperar más éxitos en el futuro.

Cráter del Merapi después de la erupción



**Merapi, Julio 2011**



**Queda un reto muy ambicioso:**

**Pronosticar no solo la fecha, sino la magnitud, el estilo y la duración de las erupciones próximas...**

**Trabajo para las nuevas generaciones de volcanólogos**

**Gracias**

