

# Anexo Técnico

Sistema de Ventanas Precursoras Sísmicas  
**HUNTER V16.1 + GLOBAL CRAWLER  $\Sigma$**

Genaro Carrasco Ozuna

December 10, 2025

## 1. Introducción

Este anexo resume la arquitectura técnica del sistema **HUNTER V16.1** y su módulo complementario **GLOBAL CRAWLER  $\Sigma$** , los cuales operan como una plataforma experimental de análisis de *ventanas precursoras sísmicas* mediante métricas derivadas de la forma de onda.

Ambos sistemas fueron desarrollados en Python usando librerías estándar como ObsPy, NumPy y SciPy. Su diseño permite ejecutar análisis en tiempo real o sobre catálogos históricos, con generación de evidencia visual y registros auditables en formato JSONL.

---

## 2. Arquitectura General del Sistema

El sistema se compone de dos capas:

### 2.1. HUNTER V16.1 EDGE SENTINEL (Feeder)

- Se conecta a catálogos sísmicos federados (IRIS, USGS, GEOFON, ETH, INGV).
- Detecta nuevos eventos sísmicos dentro de una ventana temporal configurable.
- Descarga una traza cercana al epicentro (canales BHZ/HHZ).
- Calcula tres magnitudes fundamentales:

**LI: Locking Index**,       $\Delta H$  : Caída Entrópica,       $t_C$  : Tiempo Causal.

- Genera evidencia visual: imágenes PNG y animaciones GIF de la traza procesada.
- Escribe un registro estructurado en `events_feed.jsonl`.
- Envía un correo interno de alerta cuando se detecta nucleación.

## 2.2. GLOBAL CRAWLER $\Sigma$ (Zoom-Out Regional/Global)

- Lee exclusivamente los eventos nuevos del archivo JSONL.
- Aplica un filtro E-Veto (rechazo de ruido): sólo acepta eventos con:

$$\Delta H \leq -0.20.$$

- Reclasifica nucleación en:
  - DIFFUSE\_NUCLEATION
  - HARD\_NUCLEATION
  - EXTREME\_NUCLEATION\_LOCAL
  - EXTREME\_NUCLEATION\_LOCKED
- Agrupa eventos por macro-región tectónica.
- Construye estados de alerta por región (niveles 0–3):
  - **0** – Background
  - **1** – Soft Precursor
  - **2** – Strong Precursor
  - **3** – Seismic Hit
- Evalúa coherencia global del campo sísmico en cuatro niveles:  
GLOBAL\_BACKGROUND, GLOBAL\_SOFT, GLOBAL\_STRONG, GLOBAL\_CRITICAL.

---

## 3. Formulación Física y Métricas Utilizadas

### 3.1. Preprocesamiento de la Señal

La traza se normaliza eliminando media y escalando por la desviación estándar:

$$x(t) = \frac{s(t) - \mu}{\sigma}.$$

### 3.2. Cálculo de la entropía y $\Delta H$

Se usa la energía puntual:

$$E_i = x_i^2.$$

La distribución de probabilidad se define como:

$$p_i = \frac{E_i}{\sum_j E_j}.$$

La entropía instantánea:

$$H = - \sum_i p_i \log p_i.$$

La entropía máxima para  $N$  muestras:

$$H_{\max} = \log N.$$

La caída entrópica:

$$\Delta H = H - H_{\max}.$$

Valores negativos de  $\Delta H$  indican *orden* o *colapso entrópico* en la señal.

### 3.3. Índice de Bloqueo (LI)

La señal se divide en dos mitades:

$$x_A = \{x_1, \dots, x_{N/2}\}, \quad x_B = \{x_{N/2+1}, \dots, x_N\}.$$

El LI es la correlación absoluta entre ambas:

$$LI = |\text{Corr}(x_A, x_B)|.$$

### 3.4. Tiempo Causal ( $t_C$ )

Se localiza el índice de máximo valor absoluto:

$$k = \arg \max_i |x_i|.$$

$$t_C = t_{\text{inicio}} + k \cdot \Delta t.$$

Este tiempo se usa como marcador del punto de máxima coherencia de la señal.

---

## 4. Clasificación de Nucleación

La decisión de nucleación se toma a partir de  $\Delta H$ :

$$\Delta H > -0.20 \Rightarrow \text{No coherente (descartado)}.$$

Los rangos empleados por el Crawler son:

$$-1.0 < \Delta H \leq -0.20 \Rightarrow \text{DIFFUSE\_NUCLEATION}$$

$$-3.0 < \Delta H \leq -1.0 \Rightarrow \text{HARD\_NUCLEATION}$$

$$\Delta H \leq -3.0 \Rightarrow \begin{cases} \text{EXTREME\_LOCAL,} & \text{si } LI < 0.05, \\ \text{EXTREME\_LOCKED,} & \text{si } LI \geq 0.05. \end{cases}$$


---

## 5. Estados Regionales de Alerta

Cada región analiza sus eventos en la ventana temporal seleccionada (típicamente 24 h). Las reglas principales:

- Nivel 3 (Seismic Hit): al menos una nucleación extrema  $\Delta H \leq -4$  en la última hora.
  - Nivel 2 (Strong Precursor): presencia de nucleaciones extremas o combinaciones múltiples de nucleaciones duras/difusas.
  - Nivel 1 (Soft Precursor): tres o más nucleaciones difusas sin mayores colapsos.
  - Nivel 0: actividad coherente mínima.
- 

## 6. Evidencia Visual

El sistema genera automáticamente:

- Imagen PNG con señal y envolvente.
- GIF animado mostrando la evolución temporal de amplitud y energía.

Estas imágenes sirven como respaldo cualitativo y auditivo de cada nucleación detectada. Los archivos se nombran de forma segura según el identificador del evento.

---

## 7. Formato de Registro JSONL

Cada línea del archivo `events_feed.jsonl` contiene un objeto:

```
{  
  "ev_id": "...",  
  "region_text": "...",  
  "lat_event": ...,  
  "lon_event": ...,  
  "mag": ...,  
  "t_c": "...",  
  "LI": ...,  
  "dH": ...,  
  "precursor_count": 0,  
  "precursor_density": 0.0,  
  "nucleation_level": "UNKNOWN",  
  "hunter_id": "S23_UNIT_ALPHA",  
  "e_veto_pass": true  
}
```

El Crawler vuelve a clasificar la nucleación independientemente del nodo que originó el evento.

---

## 8. Conclusión

El sistema HUNTER V16.1 + GLOBAL CRAWLER  $\Sigma$  constituye una plataforma experimental de análisis de ventanas precursoras sísmicas basada en métricas reproducibles de forma de onda.

Su arquitectura modular permite:

- Evaluación independiente por instituciones técnicas.
- Pruebas controladas con catálogos históricos o flujos en tiempo real.
- Auditoría abierta de todos los registros generados.

Se propone utilizar este sistema en modo estrictamente observacional para su correspondiente evaluación técnica.