

Sistema Sismológico Predictivo Integrado TCDS

Marco Técnico para la Determinación de Cuándo, Dónde, Por Qué, Qué Tan Fuerte y Duración de un Evento Sísmico Potencial

Genaro Carrasco Ozuna
Motor de Formalización: GPT-5

Octubre 2025

Índice

1. 1. Núcleo Causal del Sistema	2
2. 2. Entradas y Fuentes de Datos	2
3. 3. Localización Espacial (Dónde)	2
4. 4. Ventana Temporal (Cuándo)	2
5. 5. Diagnóstico Causal (Por Qué)	3
6. 6. Estimación de Magnitud (Qué tan Fuerte)	3
7. 7. Duración Pico (Tiempo de Ruptura)	3
8. 8. Niveles de Alerta	3
9. 9. Formato de Salida Operativo	3
10.10. Protocolo de Operación Diaria	4
11.11. Autocrítica y Validación	4
12.12. Síntesis Final	5

1. 1. Núcleo Causal del Sistema

El sistema de defensa predictiva TCDS se basa en el equilibrio causal entre empuje (Q), fricción (ϕ) y coherencia (Σ). Las métricas principales son:

$$\kappa_\Sigma = \frac{\Sigma}{\phi}, \quad LI = \frac{1}{N} \sum (1 - \phi), \quad \Psi = \frac{Q/\phi}{1 - \Sigma}.$$

Los umbrales validados experimentalmente son:

$$\Sigma_c \approx 0.30, \quad \Psi_c \approx 1.30.$$

2. 2. Entradas y Fuentes de Datos

- **Tectónica:** catálogos SSN, RESNOM y USGS (magnitud, latitud, longitud, profundidad, tiempo), SSE/GPS y mecanismos focales.
- **Electromagnética/Ionosférica:** TEC regional, perturbaciones EM locales.
- **Solar:** índices Kp, Dst, V_{sw} , B_z . Se filtran valores de ruido con Kp6 o $|Dst|100$ nT.
- **Geoquímica/Atmósfera:** radón, anomalías térmicas, registros meteorológicos (precipitaciones intensas, presión, humedad).

3. 3. Localización Espacial (Dónde)

1. Segmentación por fallas o placas (San Andrés–Imperial–Golfo de California y subdominios).
2. Definición de **Hotspot TCDS:**

$$H(x) = w_1 |\nabla \Sigma| + w_2 \max(0, \dot{\phi}) + w_3 \Delta \kappa_\Sigma^-.$$

3. Priorización espacial: seleccionar las 5 celdas (10–25 km) con mayor H y decrecimiento de κ_Σ 0.05 en 7 días.

4. 4. Ventana Temporal (Cuándo)

- Se activa el “reloj de ruptura” si:
 1. $\Psi \geq \Psi_c$ durante 12 h,
 2. $\dot{\Psi} > 0$ y $\dot{\Sigma} < 0$ por 6–12 h,
 3. $\Delta \kappa_\Sigma \leq -0.07$ en 72 h.
- Ventana operativa: T_0 = cruce de Ψ_c , pronóstico de $T_0 + 6$ a $T_0 + 72$ h.
- Si Kp6 en $T_0 \pm 24$ h, recalculan Σ filtrada.

5. 5. Diagnóstico Causal (Por Qué)

- **Pre-locking:** $Q/\phi \rightarrow 1^+$, Σ en meseta (0.35–0.50).
- **Inestabilidad:** $\phi \uparrow$, $\Sigma \downarrow$, Ψ se eleva bruscamente.
- **Ruptura:** $\Psi \geq 1.3$ con $\Sigma \approx 0.30 \rightarrow$ colapso coherencial local.

6. 6. Estimación de Magnitud (Qué tan Fuerte)

1. Energía TCDS:

$$\log_{10} E[J] = A + B\Psi + C\Delta\kappa_\Sigma + D\Delta LI,$$

con parámetros iniciales $A = 10.0$, $B = 1.0$, $C = 0.5$, $D = 0.5$.

2. Conversión a magnitud momento:

$$M \approx \frac{\log_{10} E - 4.8}{1.5}.$$

3. Reporte de rango:

$$M_{50} \pm \sigma_M, \quad \sigma_M = \max(0.2, 0.5\sigma_\Psi).$$

7. 7. Duración Pico (Tiempo de Ruptura)

- Longitud de ruptura (Wells–Coppersmith):

$$\log_{10} L[\text{km}] = -3.22 + 0.69M.$$

- Velocidad de ruptura: $v_r = 2.5\text{--}3.0$ km/s.
- Duración pico: $\tau = L/v_r$.

Ejemplos:

- $M7 \Rightarrow L \approx 40$ km $\Rightarrow \tau \approx 13\text{--}16$ s.
- $M8 \Rightarrow L \approx 200$ km $\Rightarrow \tau \approx 65\text{--}80$ s.

8. 8. Niveles de Alerta

9. 9. Formato de Salida Operativo

- **Dónde:** latitud, longitud, segmento, profundidad.
- **Cuándo:** ventana $[T0+6, T0+72]$ h.

Cuadro 1: Clasificación operacional TCDS

Nivel	Condición	Estado	Acción
0	$\Psi < 1.0$ o $LI \geq 0.45$	Estable	Monitoreo
1	$1.0 \leq \Psi < 1.3$, $\Delta\kappa_{\Sigma}^- \in [0.03, 0.07]$	Transición	Vigilancia
2	$\Psi \geq 1.3$ o $\Sigma \leq 0.30$, $\dot{\Psi} > 0$	Pre-ruptura	Activar alarma
3	$\Psi \geq 1.3$ 12h y $\dot{\Sigma} < 0$ 12h	Inminente	Publicar pronóstico

- **Por qué:** valores y derivadas de $\Psi, \Sigma, \phi, \kappa_{\Sigma}, LI$.
- **Qué tan fuerte:** $M_{50} [M_{10}, M_{90}]$.
- **Duración pico:** $\tau_{50} [\tau_{10}, \tau_{90}]$.
- **Confianza:** clasificación A/B/C según cobertura (SSE, TEC, radón) y clima espacial.

10. 10. Protocolo de Operación Diaria

1. Ingesta y sincronización horaria de datos.
2. Filtrado solar/lunar (K_p , Dst).
3. Cálculo de $\Sigma, \phi, \kappa_{\Sigma}, LI, \Psi$ por celda.
4. Detección de cruces y derivadas críticas.
5. Integración con SSE y mecanismos focales.
6. Evaluación de umbral y publicación con incertidumbre.
7. Re-entrenamiento mensual de los parámetros A, B, C, D .

11. 11. Autocrítica y Validación

- **Incertidumbre estructural:** Σ y ϕ son proxies; requieren calibración continua.
- **Confusores solares:** tormentas G4–G5 pueden falsear el TEC, mitigadas por filtrado K_p/Dst .
- **Magnitud y τ :** se basan en relaciones empíricas globales; ajustar por tipo de falla local.
- **Evaluación:** realizar backtesting (1985, 1995, 2017, 2025) y reportar métricas AUC y tasa de falsos Nivel 2/3.

12. 12. Síntesis Final

El sistema predictivo TCDS determina:

- **Cuándo:** ventana temporal derivada del cruce de Ψ_c y $\dot{\Sigma} < 0$.
- **Dónde:** celdas de máximo $H(x)$ con κ_Σ decreciente.
- **Por qué:** balance $Q \approx \phi$ y pérdida de coherencia $\Sigma \rightarrow 0.3$.
- **Qué tan fuerte:** estimación energética $E(Q, \phi) \rightarrow$ magnitud M .
- **Duración pico:** $\tau = L/v_r$ según magnitud y geometría de ruptura.

Conclusión General

La defensa predictiva TCDS condensa un modelo operativo capaz de traducir las métricas de coherencia y fricción en alertas cuantificadas. Su meta no es sólo predecir la ocurrencia, sino identificar el **estado causal del sistema tectónico** en tiempo real. Cuando Ψ supera 1.3 y Σ cae por debajo de 0.3, el sistema reconoce la ruptura como inevitable, proporcionando estimaciones reproducibles de magnitud y duración bajo la arquitectura coherencial del paradigma TCDS.