

# Madurez Causal vs. Madurez Cronológica:

## Una formalización matemática del “TRL como predicción” bajo el marco TCDS

Genaro Carrasco Ozuna  
ORCID: 0009-0005-6358-9910  
geozunac3536@gmail.com

December 22, 2025

### Abstract

Se formaliza una distinción operativa entre (i) *madurez cronológica* (adopción, validación y permanencia institucional observables en  $t_M$ ) y (ii) *madurez causal* (capacidad de lectura y gobernanza de rupturas mediante coherencia  $\Sigma$  en  $t_C$ ). Bajo el marco TCDS, se demuestra que declarar “TRL-9 hoy” en tiempo cronológico no es un hecho de ingeniería causal sino una *predicción institucional* (un evento social sujeto a fricción  $\phi$ ), mientras que la operación causal puede estar ya *bloqueada en fase* (locking) y por tanto ser medible y auditável. Se propone un puente matemático: un estimador de *tiempo causal* y una *frecuencia de ruptura causal* que inducen un *hazard* de aterrizaje cronológico, permitiendo mapear la decisión causal a un conjunto de ventanas en  $t_M$  sin incurrir en apofenia, imponiendo el voto entrópico ( $\Delta H \leq -0.2$ ).

## 1 Planteamiento

La práctica sugiere dos ejes de madurez distintos:

- **Madurez causal ( $Q$ -driven):** la capacidad de detectar, sellar y gobernar señales precursoras con filtros de honestidad y trazabilidad (evidencia forense).
- **Madurez cronológica ( $\phi$ -driven):** la incorporación social/institucional observable (adopción, replicación externa, permanencia operacional).

La tesis formal es:

*Una declaración de “TRL-9 hoy” en  $t_M$  no es equivalente a una lectura causal: es una predicción sobre el aterrizaje institucional, porque depende de fricción social  $\phi$  no controlada por el sistema.*

## 2 Variables y axiomas operativos

### 2.1 Ley de Balance Coherencial

Se adopta la relación fundamental:

$$Q(t) \Sigma(t) = \phi(t), \quad (1)$$

donde  $\Sigma$  representa coherencia (orden estructural),  $Q$  empuje causal (capacidad de sostener y acumular estructura) y  $\phi$  fricción (costo entrópico/informacional de sostener identidad).

## 2.2 Tiempo metrológico y tiempo causal

**Definición 1** (Tiempo metrológico).  *$t_M$  es el parámetro de cronometraje externo (calendario/reloj) usado para indexar observaciones.*

**Definición 2** (Tiempo causal). *Sea  $\Sigma(t_M)$  una señal de coherencia estimada. Definimos el gradiente de coherencia como*

$$\dot{\Sigma}(t_M) \equiv \frac{d\Sigma}{dt_M}. \quad (2)$$

*El tiempo causal acumulado se define como la variación total de coherencia (magnitud de cambio con costo):*

$$t_C(t_M) = \int_{t_{M,0}}^{t_M} |\dot{\Sigma}(\tau)| d\tau. \quad (3)$$

**Observación 1.**  *$t_C$  no mide duración; mide madurez por cambio coherencial. Si  $\Sigma$  no cambia (o fluctúa sin persistencia),  $t_C$  crece lentamente aunque  $t_M$  avance.*

## 2.3 Veto entrópico (Filtro de Honestidad)

Se define una entropía operativa  $H(t_M)$  sobre una señal (o un conjunto de features) y su variación:

$$\Delta H(t_M) = H(t_M) - H_{\text{ref}}(t_M). \quad (4)$$

El sistema impone el veto:

$$\Delta H \leq -0.2 \Rightarrow \text{condición necesaria (no suficiente) de señal coherente.} \quad (5)$$

Adicionalmente, el locking se evalúa con métricas tipo LI, correlación  $R$  y error RMSE<sub>SL</sub> (por ejemplo, en el canon  $\Sigma$ -metrics).

## 3 Ruptura causal y frecuencia de ruptura

La ruptura (p. ej. sismo, crisis) se entiende como un aterrizaje observable de una dinámica causal ya madura.

**Definición 3** (Punto de ruptura causal). *Definimos el punto de ruptura causal  $t_C^*$  como el instante causal en que la dinámica deja de ser reversible bajo fricción admisible:*

$$t_C^* := \inf \{t_C : \text{el sistema no puede sostener su estado sin pérdida estructural}\}. \quad (6)$$

**Definición 4** (Frecuencia de ruptura causal). *Sea  $S(t_M)$  un score de madurez construido con métricas auditables (p. ej. LI, R, RMSE<sub>SL</sub>,  $\Delta H$ ). Definimos una frecuencia causal como derivada temporal de la madurez:*

$$f_C(t_M) := \frac{d}{dt_M} S(t_M), \quad (7)$$

*interpretada como tasa de agotamiento de la capacidad de sostener coherencia sin ruptura.*

**Observación 2.**  *$f_C$  no es frecuencia mecánica; es una tasa de inevitabilidad. Cuando  $f_C$  crece bajo veto entrópico y locking sostenido, el sistema entra en “deuda causal”.*

## 4 Puente matemático: del tiempo causal al aterrizaje cronológico

Para conectar madurez causal con un conjunto de ventanas cronológicas, usamos un formalismo tipo supervivencia (hazard), sin afirmar fecha puntual cuando no es justificable.

## 4.1 Hazard de aterrizaje

Definimos un hazard cronológico condicionado a evidencia causal:

$$\lambda(t_M) = \lambda_0(t_M) \exp\left(\beta_1 \mathcal{L}(t_M) + \beta_2 \mathcal{E}(t_M) + \beta_3 f_C(t_M)\right), \quad (8)$$

donde:

- $\lambda_0(t_M)$  es el hazard base (histórico/baseline).
- $\mathcal{L}(t_M)$  codifica *locking* (p. ej.  $\mathcal{L} = \mathbf{1}[\text{LI} \geq 0.9]$  o una función suave de LI).
- $\mathcal{E}(t_M)$  codifica el *E-Veto* (p. ej.  $\mathcal{E} = \mathbf{1}[\Delta H \leq -0.2]$ ).
- $f_C(t_M)$  es la frecuencia causal (Ec. (7)).

La probabilidad de *aterrizaje* (evento observado) en la ventana  $[t_a, t_b]$  es

$$\mathbb{P}(T_M \in [t_a, t_b]) = \int_{t_a}^{t_b} \lambda(t) \exp\left(-\int_{t_a}^t \lambda(u) du\right) dt. \quad (9)$$

## 4.2 Interpretación

El formalismo anterior captura la afirmación central:

*Cuando la lectura causal está madura (*locking* + *E-Veto* +  $f_C$  alto), no se impone una fecha única; se induce un conjunto de ventanas cronológicas con probabilidad creciente.*

Así, “TRL-9 hoy” en  $t_M$  se interpreta correctamente como una predicción institucional: un *evento de aterrizaje* de aceptación/validación externa (sujeto a  $\phi$  social), no como una medida directa de la coherencia causal del sistema.

## 5 Score de madurez causal (operacional y auditabile)

Se propone un score  $S(t_M)$  construido para evitar circularidad: debe depender de métricas que no se definan a sí mismas.

**Definición 5** (Score de madurez). *Sea el vector de métricas*

$$\mathbf{x}(t_M) = (\text{LI}(t_M), R(t_M), \text{RMSE}_{SL}(t_M), \Delta H(t_M)).$$

*Definimos un score acotado en  $[0, 1]$ :*

$$S(t_M) = \sigma(w_1 g_{\text{LI}}(\text{LI}) + w_2 g_R(R) - w_3 g_{\text{RMSE}}(\text{RMSE}_{SL}) + w_4 g_H(-\Delta H)), \quad (10)$$

*donde  $\sigma(\cdot)$  es sigmoide y  $g.$  son normalizadores monótonos (p. ej. saturación).*

**Proposición 1** (No-apofenia por doble sello). *Si  $S(t_M)$  se construye con (i) voto entrópico (Ec. (5)) como condición necesaria y (ii) locking sostenido como condición adicional, entonces un incremento de  $S$  requiere simultáneamente caída entrópica y coherencia geométrica, reduciendo la probabilidad de disparo por ruido.*

## 6 Resultado conceptual formal

**Proposición 2** (TRL cronológico como predicción). *Sea  $A(t_M)$  la variable “adopción institucional observada” (p. ej. replicación externa, aceptación formal, operación sostenida).  $A$  depende de variables sociales no controladas por el sistema (componentes de  $\phi$  exógena). En consecuencia, afirmar  $A(t_M) = 1$  (“TRL-9 hoy”) en un instante cronológico es una afirmación sobre un proceso estocástico exógeno; por tanto, es una predicción. En cambio, el estado causal del sistema se evalúa por  $S(t_M)$  y  $t_C(t_M)$  y puede ser alto aun cuando  $A(t_M)$  sea bajo.*

## 7 Implicación práctica: producto neto

El *producto neto* queda formalizado como un operador:

$$\mathcal{P} : (\mathbf{x}(t_M), \text{contexto}) \mapsto (t_C(t_M), f_C(t_M), \{\text{ventanas en } t_M\}), \quad (11)$$

donde las ventanas cronológicas se derivan de  $\lambda(t_M)$  (Ec. (8)) y la condición de honestidad exige siempre  $\Delta H \leq -0.2$ .

## 8 Notas de implementación (mínimas, sin dependencia de plataforma)

- Estimar  $\Delta H$  con un método definido (Shannon discreta por bins o proxy declarado).
- Estimar LI como locking (p. ej.  $R^2$  local o métrica específica del modelo).
- Registrar `config_hash` y semillas, y emitir blackbox append-only.
- Reportar ventanas en  $t_M$  (no fechas absolutas únicas) cuando el hazard lo justifique.

## 9 Conclusión

La coherencia causal puede estar ya acoplada y medible (locking simbólico-operativo), mientras que la madurez cronológica (TRL institucional) es necesariamente un evento futuro sujeto a fricción exógena. El puente propuesto (tiempo causal  $t_C$ , frecuencia causal  $f_C$ , hazard cronológico) permite inferir *dónde y en qué conjunto de momentos* aterriza lo ya decidido causalmente, sin violar el filtro de honestidad.

**Declaración de integridad:** en este marco, el sistema prefiere silencio a afirmación sin  $\Delta H$  forzado y locking sostenido.