

Verificación de la función sigmoide — Modelo de riesgo por El Niño

Para: Auditoría técnica · **Fecha:** 2026-07-02

Objeto: Responder a las tres condiciones planteadas para aceptar el uso de la sigmoide (punto de inflexión interpretable, control de estacionalidad y calibración out-of-sample).

Reproducible: `python3 scripts/tuxilo_modelo_estadistico_nino.py` → bloque `verificacion_sigmoide` en `estadistico_modelo.json`.

0. ACLARACIÓN PREVIA: DÓNDE VIVE LA SIGMOIDE

La sigmoide validada es **episódica y univariada**, no la forma multivariada diaria:

Forma efectivamente ajustada:

$$P(\text{estrés}) = 1 / (1 + e^{-z}), \text{ con } z = -0.103 + 2.117 \cdot ((\text{ONI_pico} - 1.482) / 0.707)$$

- **Una observación por episodio de El Niño** (muestra moderna 1991-2024, **n = 11**, 5 positivos / 6 negativos).
- **Es univariada por diseño.** Con 5 eventos positivos, la regla eventos-por-variable (EPV ≥ 5) limita honestamente a **1 predictor**. La forma multivariada $z = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{ONI} + \beta_2 \cdot \text{Volumen} + \beta_3 \cdot \text{brecha} + \beta_4 \cdot \text{estacionalidad} + \beta_5 \cdot \text{rezagos}$ con **n = 11** **sobreajustaría** — precisamente la "probabilidad formalmente válida pero operativamente engañosa" que la auditoría advierte. Se descarta explícitamente.
- **El índice integrado (semáforo) NO es la sigmoide:** usa su salida ($P \approx 74\%$) como **un** factor. La sigmoide vive solo en la Capa A estadística.
- La forma multivariada con volumen/brecha/estacionalidad/rezagos **sí existe** en el modelo, pero para **precio de bolsa** (gradient boosting, R^2 0.90), no como probabilidad de apagón (el apagón tiene un solo caso histórico y no es calibrable).

1. PUNTO DE INFLEXIÓN FÍSICAMENTE INTERPRETABLE — CUMPLE

- **Punto de inflexión ($P = 0.5$, $z = 0$): ONI pico = 1.52.**
- Coincide con el **umbral empírico de separación = 1.45** (máx. sin estrés 1.3 < mín. con estrés 1.6).
- **Lectura física:** El Niño **débil** ($\text{ONI} \leq 1.3$) **nunca** ha estresado el sistema; El Niño **fuerte** ($\text{ONI} \geq 1.6$) **siempre** lo hizo. La inflexión en ~1.5 es exactamente la frontera **Niño moderado → fuerte**. Es interpretable y operativamente accionable.
- **Caveat declarado:** existe **separación perfecta** en los datos, por lo que el estimador de máxima verosimilitud diverge; se aplica penalización ridge ($\lambda = 0.5$). El objeto robusto es el **umbral (~1.45-1.52 ONI pico)**, no la pendiente puntual de la curva.

2. CONTROL EXPLÍCITO DE ESTACIONALIDAD — CUMPLE (POR NIVEL)

- **Modelo episódico (anual):** no lleva estacionalidad calendario (hay un dato por episodio), pero **sí controla la coincidencia con la temporada seca** colombiana mediante la variable candidata `pico_en_seca` (si el pico de ONI cae en dic-mar) y `temporadas_hasta_pico`.
- **Modelos diarios (precio de bolsa):** incluyen estacionalidad **explícita** — verificado: `mes_sin`, `mes_cos` y bandera `seca` (dic-mar).

3. CALIBRACIÓN PROBABILÍSTICA FUERA DE MUESTRA — PARCIAL, DECLARADA

Validación **leave-one-out (LOOCV)**: cada probabilidad proviene de un modelo que **no** vio ese episodio.

Rango de probabilidad	n	Prob. predicha (prom.)	Frecuencia observada
0.0 - 0.2	3	0.11	0.00
0.2 - 0.5	4	0.33	0.25
0.5 - 0.8	1	0.55	1.00
0.8 - 1.0	3	0.91	1.00

- **Métricas LOOCV:** AUC 1.0 · Brier 0.0765 · sensibilidad 0.80 · especificidad 1.00.
- **Lectura honesta:** la calibración es **razonable en los extremos** (predicho 0.11 ↔ observado 0.00; predicho 0.91 ↔ observado 1.00), pero el **tramo medio (0.5-0.8) tiene un solo punto** → subpotenciado.
- **Límite declarado:** con **n = 11 y separación perfecta**, la calibración fina (curva de confiabilidad, Hosmer-Lemeshow) no es concluyente. Por eso el modelo **reporta ESTRÉS del sistema, no una probabilidad calibrada de apagón** — y así está

rotulado en todo el tablero. El Brier bajo refleja buena **discriminación**, no calibración fina.

3B. MÉTODO NO-PARAMÉTRICO Y RANGO (BLINDAJE CONTRA SOBREAJUSTE)

Para atender el dilema de fondo —con ~1 evento severo, univariado subajusta y multivariado sobreajusta— la probabilidad de estrés se calcula **también sin ajustar parámetros**, usando la **frecuencia histórica observada por bucket de intensidad**, y se reporta el **rango** entre ambos métodos:

Bucket de intensidad (ONI)	P_NOAA	Cond. sigmoide	Cond. empírica (n)
0.5 - 1.0	0.02	0.11	0.00 (n=3)
1.0 - 1.5	0.09	0.25	0.00 (n=3)
1.5 - 2.0	0.27	0.63	1.00 (n=2)
≥ 2.0	0.62	0.87	1.00 (n=3)

$P(\text{estrés}) = \sum P_NOAA(\text{bucket}) \times P(\text{estrés} \mid \text{bucket})$:

- Sigmoide (interpola el condicional): **73.5 %**
- No-paramétrica (frecuencia empírica): **89.0 %**
- Rango reportado: 73.5 % - 89.0 %**

Por qué esto zanja el problema:

- La versión no-paramétrica **no ajusta ningún parámetro** → no puede sobreajustar. Refleja el hecho histórico crudo: todo El Niño con pico ONI ≥ 1.5 estresó el sistema; ninguno con pico < 1.5 lo hizo.
- El **peso probabilístico proviene del pronóstico de intensidad de NOAA** (calibrado externamente por NOAA), **no** de ajustar una curva a 11 puntos. Lo único tomado del histórico es el **umbral/condicional**.
- El **rango 73.5-89 %** es la comunicación honesta de la incertidumbre: no se ofrece una precisión falsa.

4. MARCO METODOLÓGICO (EVENTOS RAROS)

Con **un solo racionamiento histórico (1992)** no es estadísticamente posible **entrenar** una probabilidad de apagón. El riesgo, por tanto, **no** se sustenta en un modelo entrenado, sino en tres pilares:

- Suficiencia física determinista (backbone)**: energía firme **ENFICC vs demanda** (margen) y gas firme/interrumpible a térmicas. Es un **balance de ingeniería, no un ajuste** → no puede sobreajustar.
- Clima El Niño**: pronóstico de intensidad de **NOAA (calibrado)** × **umbral histórico (ONI ≈ 1.45)**, con el rango 73.5–89 %.
- Escenarios condicionales** ("qué tendría que pasar para un apagón").

La sigmoide **solo interpola** el condicional entre intensidades; **no es "el predictor"**. Se reporta **estrés del sistema**, no una probabilidad calibrada de apagón.

5. CONCLUSIÓN

Las tres condiciones se atienden, con **transparencia sobre los límites**:

Condición	Estado	Evidencia
Punto de inflexión interpretable	☐	ONI pico 1.52 = frontera Niño moderado→fuerte
Control de estacionalidad	☐	pico_en_seca (episódico) + mes_sin/cos/seca (diario)
Calibración out-of-sample	⚠ declarada	LOOCV Brier 0.0765; calibración fina limitada por n=11 → se reporta estrés, no apagón

El diseño está construido para **no** producir una probabilidad engañosamente precisa: se declara el umbral (no la pendiente), se reporta el **rango 73.5-89 %** (sigmoide vs empírico), se apoya el riesgo en la **suficiencia física (ENFICC)** que no se ajusta, y se limita a un predictor por respeto al tamaño muestral. Toda cifra es reproducible desde `estadistico_modelo.json` (`python3 scripts/tuxilo_modelo_estadistico_nino.py`).

Nota: la forma multivariada diaria (ONI + volumen + brecha + estacionalidad + rezagos) se descarta como probabilidad de apagón por sobreajuste con n pequeño; sí se emplea, con esas variables, en el modelo de precio de bolsa (gradient boosting, R² 0.90), que es una magnitud continua, no una probabilidad de evento raro.