

Thickener Water Recovery Sentinel (TWS)

¿Podemos anticipar las crisis de turbidez antes de que ocurran?
Un proof-of-concept de Machine Learning para espesadores Cu/Mo

Datos Dataset sintético calibrado · 90 días · 5 minutos · 25,920 registros

Versión v1.0 — Febrero 2026

El problema

Las crisis de turbidez en el overflow del espesador son uno de los eventos de mayor impacto en la recuperación de agua de una planta concentradora. Cuando el overflow supera los **100 NTU de forma sostenida**, el agua clarificada ya no es apta para recircular al circuito de flotación: se pierde agua de proceso, se compromete la recuperación de Cu/Mo, y se activa una maniobra de emergencia que el operador debe ejecutar contra el tiempo.

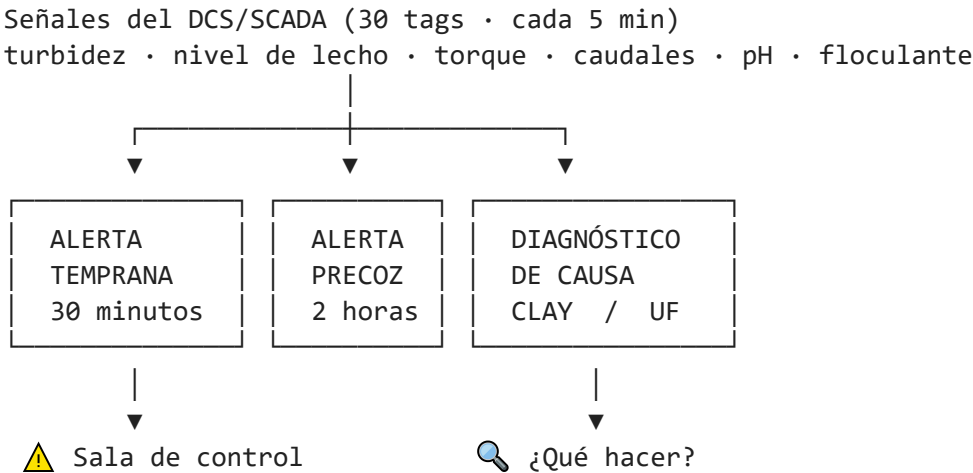
El sistema de monitoreo estándar — una alarma que se activa cuando la turbidez ya cruzó el umbral — avisa **cuando el problema ya ocurrió**. El operador recibe la alerta, identifica la causa, aplica la corrección (ajuste de floculante, caudal de purga), y espera el efecto. Todo eso toma entre 20 y 40 minutos adicionales.

La pregunta central de TWS: ¿pueden las señales del proceso — nivel de lecho, torque del rastrillo, caudal de underflow, pH, turbidez — advertir una crisis 30 minutos antes de que ocurra?

La respuesta corta es **sí, en gran medida**. Y el diagnóstico de la causa también es automatizable con los datos que ya existen en planta.

¿Cómo funciona TWS?

TWS no reemplaza al operador ni al metalurgista — los potencia. El sistema analiza en forma continua las señales del DCS y produce tres tipos de salida:



La lógica subyacente es simple: el sistema aprende, a partir del historial de operación, qué combinación de señales precede habitualmente a una crisis. No adivina — reconoce patrones que ya ocurrieron antes.

Componente	Pregunta	Señal de entrada	Valor operacional
Alerta Temprana	¿Habrá crisis en 30 min?	30 tags de proceso	Tiempo para actuar antes de la crisis
Alerta Precoz	¿Hay riesgo en las próximas 2h?	30 tags (zona verde)	Acción preventiva más temprana
Diagnóstico	¿La causa es CLAY o falla de underflow?	Nivel de lecho + otros	Acción correctiva específica y rápida




El dataset: 90 días de un espesador simulado

TWS fue desarrollado y evaluado sobre un **dataset sintético calibrado** — un simulador de proceso que reproduce el comportamiento dinámico de un espesador Cu/Mo, incluyendo fallas de sensor realistas (picos, valores pegados, deriva) y dos tipos de perturbación operacional:

- **CLAY:** ingresos de arcilla fina que interfieren con la floculación → lecho alto y rígido, consumo elevado de floculante
- **UF (Underflow Failure):** degradación del sistema de purga → acumulación de sólidos, caída de caudal de underflow

¿Por qué sintético? Porque en la mayoría de las plantas no existe un historial etiquetado que identifique la causa raíz de cada evento. El simulador permite desarrollar y validar el framework metodológico. **Los datos reales de planta son el siguiente paso necesario** — y el propósito de este documento.

¿Cuántas veces entra en crisis el espesador?

Zona operacional	Criterio	Fracción del tiempo
 Verde — operación normal	Turbidez < 50 NTU	77.8%
 Degradado — requiere atención	50 – 100 NTU	12.8%
 Crisis sostenida	> 100 NTU por ≥ 20 min	5.1%

El 5.1% equivale a aproximadamente **4–5 días de crisis por cada 90 días de operación** — un número significativo en términos de agua perdida y riesgo al circuito de flotación.

Resultado 1: Alerta Temprana a 30 Minutos

¿Qué logra?

El sistema analiza las señales del proceso en tiempo real y emite una alerta cuando detecta que el espesador se encamina hacia una crisis en los próximos 30 minutos — mientras la turbidez todavía está en zona degradada pero aún no es crisis.

¿Cuánto mejor que la alarma actual?

	Alarma actual (NTU > 80)	TWS — Alerta Temprana
Momento del aviso	Cuando la crisis ya está en curso	30 minutos antes
Eventos detectados	~6 de cada 10	8 de cada 10
Falsas alarmas	—	~2 por día (en 90 días de simulación)

En términos concretos: de las 523 crisis que ocurrieron en los 30 días de evaluación, el sistema alertó correctamente en 416 casos con al menos 30 minutos de anticipación. En 107 casos no detectó la crisis a tiempo — principalmente eventos de aparición muy abrupta.

¿Por qué tiene sentido desde el proceso?

Las señales que el sistema aprende a combinar son exactamente las que un metalurgista experimentado monitorearía en forma manual:

Señal	Por qué precede a la crisis
Turbidez medida (rolling 15–30 min)	Tendencia sostenida al alza distingue el inicio real de la crisis vs. picos transitorios del sensor
Caudal de underflow (Qu)	Caída de Qu precede al colapso del lecho en modo UF
Nivel de lecho (rolling 12h)	Acumulación progresiva en escala de turno refleja estrés crónico
Torque del rastrillo (rolling 1h)	Aumento de resistencia indica densificación del lecho antes de la crisis

El sistema no usa variables que no estén disponibles en planta real — solo señales del DCS estándar.

Resultado 2: Diagnóstico de Causa — CLAY o Falla de Underflow

Saber que viene una crisis no es suficiente si el operador no sabe qué hacer. La acción correctiva depende de la causa:

Causa	Señal característica	Acción correctiva
CLAY	Nivel de lecho alto y sostenido, torque elevado	Aumentar floculante · Dilución en feedwell · Reducir carga de alimentación
UF	Caída de caudal de underflow, lecho moderado	Aumentar caudal de purga · Revisar bomba/válvula · Monitorear densidad

Aplicar la acción de UF a un evento CLAY — o viceversa — puede agravar el evento.

El hallazgo: el nivel de lecho es casi un diagnóstico perfecto

El análisis reveló que una **regla simple de proceso** supera a cualquier modelo de ML para este diagnóstico:

Si $\text{BedLevel} > 1.9 \text{ m}$ → **causa probable: CLAY**

Si $\text{BedLevel} \leq 1.9 \text{ m}$ → **causa probable: falla de underflow**

Exactitud en datos de evaluación: **93.1%** (339 de 364 eventos correctamente clasificados)

La razón es física: la arcilla forma una capa densa y rígida que eleva el lecho de forma sostenida, mientras que la falla de underflow no genera esa acumulación. Esta regla **puede implementarse en el DCS hoy mismo**, sin necesidad de modelos de ML.

El modelo de ML actúa como segunda opinión cuando el sensor de nivel de lecho falla o cuando se busca diagnóstico temprano antes de que el lecho haya divergido.

Resultado en datos de evaluación (364 eventos de crisis)

	Diagnosticado: CLAY	Diagnosticado: UF
Real: CLAY (236 eventos)	183	53
Real: UF (128 eventos)	0	128

Los 53 eventos CLAY mal clasificados corresponden a campañas de baja intensidad donde el lecho no alcanzó el umbral de 1.9 m — el escenario donde el modelo ML complementa la regla simple.

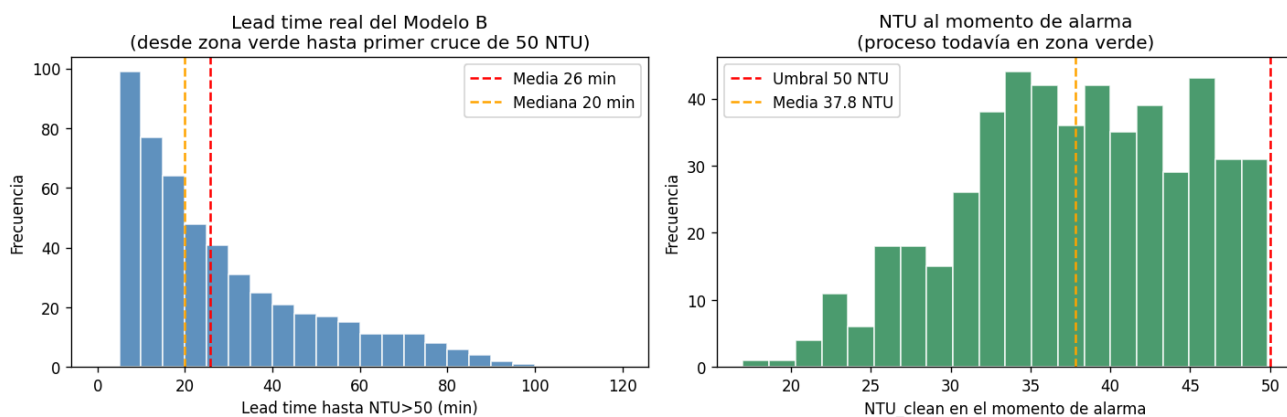
Resultado 3: Alerta Precoz a 2 Horas — y el Límite del Dato de Sensor

La ambición

Si el operador pudiera saber **2 horas antes** que el proceso se encamina hacia una crisis, tendría tiempo para ajustes preventivos suaves: corregir la dosis de floculante gradualmente, anticipar un cambio de turno, reducir la carga de alimentación sin impacto en producción.

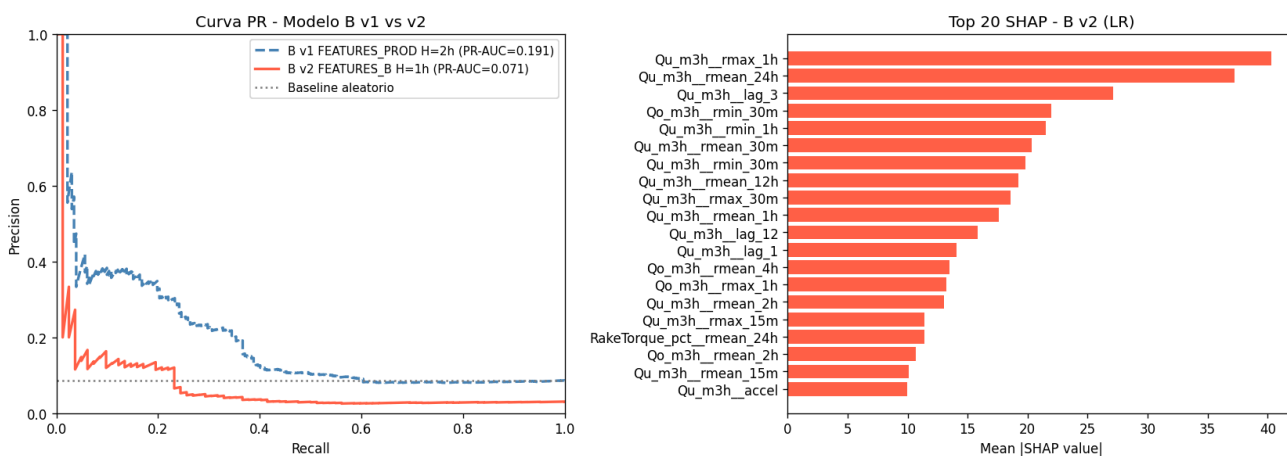
El problema: en zona verde, las señales del sensor son silenciosas

El análisis del comportamiento real del proceso mostró algo revelador:



El 71% de las degradaciones ocurren dentro de los 30 minutos siguientes a la última observación en zona verde. El proceso pasa de $NTU \approx 38$ a $NTU > 50$ en tiempo muy corto — y durante ese tiempo en zona verde, los sensores del DCS muestran valores completamente normales.

Es el mismo problema que anticipar una tormenta con solo un termómetro local: la señal predictiva a 2 horas plazo no está en los sensores de proceso del espesador — está en la mineralogía de lo que está entrando a la planta.



¿Qué logra el modelo con solo datos de sensor?

El modelo de alerta precoz detecta aproximadamente **1 de cada 8 eventos** con 2 horas de anticipación — mejor que no tener nada, pero insuficiente para uso operacional confiable.

¿Qué lo desbloquearía?







El factor limitante no es el algoritmo sino la **disponibilidad de datos de composición de la alimentación**:

Dato adicional	Disponibilidad típica	Impacto esperado en la alerta precoz
Análisis granulométrico (% arcilla, % -200 mesh)	Laboratorio, 4–8 h de delay	Alto — el ingreso de arcilla es predecible con este dato
Datos de planificación minera (zona de extracción)	Sistema de despacho, 8–24 h	Medio — correlación con tipo de roca
Sensores en línea (FBRM, densímetro de alimentación)	Tiempo real, si están instalados	Alto — señal inmediata de composición

La alerta precoz de 2 horas es técnicamente alcanzable — pero requiere integrar datos que hoy no están en el DCS estándar. Definir cuáles están disponibles en cada planta es parte del trabajo de validación con datos reales.

Cómo se integran los tres componentes: la ventana operacional

El timeline siguiente muestra cómo actuaría TWS durante un evento típico de tipo CLAY, comparado con el sistema de alarma actual:

TIEMPO SIN TWS	TURBIDEZ	ZONA	CON TWS
T - 2h Sin señal	38 NTU	 Verde	Alerta precoz: pH↑ + lecho↑ (señal débil, requiere lab data)
T - 26m Sin señal	50 NTU	 Degradado	Alerta temprana activa
T - 30m Sin señal	80 NTU	 Degradado	 ALERTA FIRME Diagnóstico: CLAY → ↑ floculante + dilución
T 0  PRIMER AVISO	100 NTU	 Crisis	Acción correctiva ya en marcha
GANANCIA 0 minutos			~30 minutos de margen efectivo

¿Qué cambia en la operación?

Con 30 minutos de margen, el operador puede aplicar la corrección de floculante de forma **gradual y controlada**, en lugar de una maniobra de emergencia. Esto implica:

- Menor consumo pico de floculante
- Menor tiempo total en zona de crisis
- Mayor volumen de agua recuperada por turno

- Menor probabilidad de impacto al circuito de flotación

El siguiente paso: validación con datos reales de planta

TWS está listo como proof-of-concept. El framework funciona sobre datos sintéticos calibrados — pero su valor real se demuestra sobre el historial operacional de un espesador real.

¿Qué se necesita?

Los datos son los que ya existen en el DCS/SCADA de cualquier planta con un espesador instrumentado:

Dato	Descripción	Período
Series de proceso	Tags 5-min: turbidez overflow, nivel de lecho, torque, caudales, densidades, floculante	6–12 meses
Registro de eventos	Bitácora de eventos de turbidez y su causa (si existe)	Ídem
Análisis de laboratorio (si disponible)	Granulometría de alimentación con timestamp	Ídem


Los datos pueden ser anonimizados. No se requiere identificar la planta o la empresa.

¿Qué se ofrece a cambio?

- ✓ **Análisis técnico completo del espesador** — caracterización de regímenes operacionales, detección de eventos históricos, análisis de causas
- ✓ **Modelos calibrados a los datos de la planta** — alerta temprana y diagnóstico ajustados al comportamiento específico del equipo
- ✓ **Código abierto y reproducible** — todo el pipeline disponible en GitHub para uso, adaptación y extensión
- ✓ **Co-autoría en publicación técnica** si los resultados lo justifican
- ✓ **Prototipo de dashboard operacional** como siguiente paso si la validación es exitosa

Hoja de ruta

Fase	Objetivo	Estado
0 — Proof of concept	Demostrar viabilidad del framework con dataset sintético	✓ Completo
1 — Validación real	Re-entrenar y evaluar sobre historial de planta real	📅 Pendiente
2 — Integración lab	Incorporar granulometría para alerta precoz de 2h	📅 Pendiente

Fase	Objetivo	Estado
3 — Prototipo operacional	Panel en sala de control · Integración DCS	 Pendiente

En resumen

Pregunta	Respuesta de TWS
¿Se puede anticipar una crisis 30 min antes?	Sí — 8 de cada 10 eventos detectados con anticipación
¿Se puede diagnosticar la causa automáticamente?	Sí — 93% de exactitud con una regla simple de nivel de lecho
¿Se puede anticipar con 2 horas de margen?	Parcialmente — requiere datos de composición de alimentación
¿Qué se necesita para llevar esto a producción?	Datos históricos reales de un espesador instrumentado

TWS no es un sistema que reemplaza el criterio operacional — es una herramienta que lo amplifica. El operador sigue tomando la decisión; el sistema le da más tiempo y más información para tomarla bien.

Si trabajás en una planta con espesadores convencionales y tenés acceso a datos históricos, esta es una invitación a colaborar.

Repositorio y contacto

Repositorio	github.com/MatiasValenzuelaMunoz/Thickener-Water-Recovery-Sentinel-TWS
Notebooks	EDA · Feature Engineering · Modelo A · Modelo B · Diagnóstico
Bitácora técnica	bitacora/ — decisiones de diseño y calibración del simulador

Thickener Water Recovery Sentinel · v1.0 · Febrero 2026