

ESTANCIA EL JABALÍ S.A.

BALANCE HÍDRICO DE CULTIVOS

Informe Técnico Agronómico

Modelo de seguimiento diario del almacenaje de agua en el suelo

Tandil, Buenos Aires — Junio 2026

1. Introducción y Objetivo

El presente documento describe la metodología, las fuentes de datos y los parámetros empleados en el modelo de Balance Hídrico de Cultivos desarrollado para la Estancia El Jabalí S.A., con sede en la región de Tandil, provincia de Buenos Aires.

El objetivo del modelo es estimar el almacenaje de agua en el suelo (SWC, Soil Water Content) de forma diaria y automatizada para cada cultivo en campaña, a partir de datos meteorológicos en tiempo real y de una parametrización agronómica configurable por el usuario.

El modelo permite detectar situaciones de déficit hídrico, generar alertas tempranas durante períodos críticos y comparar el estado actual de cada lote con el intervalo histórico normal de los últimos 26 años (2000–2025), construido a partir de la base meteorológica de la EEA INTA Balcarce. La metodología central se basa en el balance hídrico de la plataforma ORA (Oficina de Riesgo Agropecuario, INTA).

2. Parámetros de Suelo

2.1 Tipo de suelo y clasificación

Los lotes de la estancia se asientan predominantemente sobre suelos Argiudoles Típicos, Serie Tandil (Typic Argiudoll), pertenecientes al orden Molisol. Esta serie es la de mayor presencia en el área de riego complementario del Sudeste Bonaerense, representando el 17,2 % de los lotes relevados en los partidos de Balcarce y Tandil (Angelini et al., 2022).

El perfil típico presenta horizonte Ap de textura franco-arcillosa en superficie (30–35 % de arcilla) con densidad aparente de 1,20–1,25 g/cm³, y horizonte argílico Bt de textura arcillosa (40–50 % de arcilla) con baja conductividad hidráulica saturada (<0,03 cm/h).

2.2 Constantes hídricas adoptadas

Los valores de Capacidad de Campo (CC) y Punto de Marchitez Permanente (PMP) se fundamentan en mediciones directas del Laboratorio de Física de Suelos de la EEA INTA Balcarce (Angelini et al., 2022) para las series Argiudol Típico del Sudeste Bonaerense:

Constante	Rango medido — INTA Balcarce	Valor adoptado en el modelo
CC volumétrica	0,33 – 0,41 cm ³ /cm ³	0,272 cm ³ /cm ³ → 340 mm/m
PMP volumétrica	0,18 – 0,20 cm ³ /cm ³	0,150 cm ³ /cm ³ → 188 mm/m
AU (0–1 m)	150 – 210 mm	152 mm/m ✓ (dentro del rango)
DA horizonte Ap	1,18 – 1,29 g/cm ³	1,25 g/cm ³

Fuente: Angelini, H.P. et al. (2022). Rev. Fac. Agronomía UNLP 121(1). Laboratorio de Física de Suelos, EEA INTA Balcarce.

El agua útil resultante ($AU = CC - PMP = 152 \text{ mm/m}$) cae dentro del rango medido de 150–210 mm para estas series, validando la parametrización. La calibración utilizó $\theta_{CC} = 27,2 \text{ \% gravimétrico} \times DA = 1,25 \text{ g/cm}^3 = 340 \text{ mm/m}$, y $\theta_{PMP} = 15,0 \text{ \%} \times 1,25 = 188 \text{ mm/m}$.

2.3 Valores por cultivo (escalados por profundidad radicular)

Las constantes hídricas se escalan linealmente según la profundidad radicular máxima esperada para cada especie. Este enfoque asume propiedades hidráulicas homogéneas en el perfil explorado, apropiado para la Serie Tandil en condiciones normales de agricultura extensiva.

Cultivo	CC (mm)	PMP (mm)	AU (mm)	Prof. raíz (m)
Trigo / Cebada / Colza	340	188	152	1,0
Soja 1ª época	408	226	182	1,2
Soja 2ª época	374	207	167	1,1
Maíz	476	263	213	1,4
Girasol Temprano / Tardío	442	244	198	1,3

El contenido hídrico inicial al momento de siembra (Agua_Inicial) se parametriza en ~89 % de CC, reflejando condiciones típicas de presiembra en Balcarce.

3. Evapotranspiración de Referencia (ETo)

3.1 Método Penman-Monteith FAO-56

La ETo se calcula diariamente mediante el método estandarizado de Penman-Monteith (Allen et al., 1998 — FAO Irrigation Paper N° 56), que es el estándar internacional para la demanda evapotranspirativa de la atmósfera:

$$ET_o = \left[0,408 \times \Delta \times R_n + \gamma \times \left(900 / (T_m + 273) \right) \times u_2 \times (e_s - e_a) \right] / \left[\Delta + \gamma \times (1 + 0,34 \times u_2) \right]$$

Donde: Δ = pendiente curva presión de vapor saturante (kPa/°C); R_n = radiación neta diaria (MJ/m²/día); γ = constante psicrométrica (kPa/°C); T_m = temperatura media (°C); u_2 = velocidad del viento a 2 m (m/s); $e_s - e_a$ = déficit de presión de vapor (kPa). La radiación extraterrestre (R_a) se calcula internamente a partir de la latitud de la estación (37,8°S) y el día del año.

3.2 Estimación de la radiación solar

El modelo utiliza la radiación solar medida (R_s) por el piranómetro de la estación Davis como dato prioritario. Cuando este valor no está disponible, se estima mediante la fórmula de Hargreaves:

$$R_s = 0,16 \times \sqrt{(T_{max} - T_{min})} \times R_a$$

Esta estimación presenta un error típico del 10–15 % en condiciones normales de amplitud térmica, pero garantiza continuidad del modelo aun sin sensor de radiación activo.

4. Coeficientes de Cultivo (Kc)

Los coeficientes de cultivo (K_c) relacionan la demanda hídrica del cultivo con la ETo de referencia según el estado fenológico. El modelo adopta las tablas y fenofases de la plataforma ORA-INTA (metodología Basualdo), referencia institucional para la región Pampeana. Los K_c se definen por DAP (día desde siembra) con interpolación lineal entre puntos de quiebre:

Cultivo	Kc inicial	Kc medio	Kc máximo	Kc final
Trigo / Cebada	0,30	1,10	1,15	0,30
Soja	0,40	1,10	1,15	0,50
Maíz	0,40	1,05	1,20	0,55
Girasol	0,35	1,00	1,15	0,35

Fuente: Tablas ORA-INTA (metodología Basualdo). Los valores exactos por estadio fenológico se configuran en las hojas Kc_[Cultivo] del archivo Excel.

5. Metodología del Balance Hídrico

El balance hídrico se ejecuta en pasos diarios desde la siembra hasta el día actual. En cada paso se calculan: evapotranspiración real (ETR), escurrimiento superficial (ESC), percolación profunda (PER) y el almacenaje resultante (ALM). La ecuación general del balance es:

$$ALM(t) = \min(CC, \max(alMin, ALM(t-1) + PP - ESC - ETR - PER + EXC(t-1)))$$

5.1 Evapotranspiración real (ETR) — Formulación ORA

La ETR incorpora una restricción proporcional al agua disponible en el suelo, siguiendo la formulación de la plataforma ORA:

$$ETR = ETo \times Kc \times (ALM / CC)$$

El factor (ALM/CC) varía de 0 a 1: cuando el suelo está a CC, ETR equivale a ETP sin restricción. A medida que el suelo se seca, ETR disminuye linealmente. Este enfoque — donde la restricción comienza desde CC y no desde un umbral intermedio — es conservador y apropiado para cultivos extensivos en la Pampa Húmeda.

5.2 Escurrimiento superficial (ESC) — Warrilow et al. (1986)

El escurrimiento superficial se calcula a partir de la lluvia y la capacidad de infiltración actual del suelo ($CI = CC - ALM$):

$$ESC = CE \times (PP + EXC) \times \exp(-CI / (PP + EXC))$$

Donde CE = coeficiente de escurrimiento (configurable, default 0,40); PP = precipitación diaria (mm); EXC = exceso hídrico del día anterior; CI = CC - ALM = déficit de saturación. Cuando el suelo está a CC ($CI \approx 0$), el escurrimiento es máximo; cuando está seco, la capacidad de infiltración es alta y el escurrimiento cae exponencialmente.

5.3 Percolación profunda (PER) — Noilhan & Lacarrere (1995)

La pérdida gravitacional se activa cuando el almacenaje supera un umbral intermedio (UI), y su magnitud depende de la textura del suelo a través del coeficiente CP:

$$UI = PMP + 0,5 \times (CC - PMP)$$

$$CP = 5,32 \times \text{Arcilla}(\%)^{-1.042} / \text{Prof_raíz}(m)$$

$$PER = CP \times (ALM - UI) \quad [\text{solo si } ALM > UI]$$

El coeficiente CP refleja la conductividad hidráulica del suelo: texturas más arcillosas producen CP más bajo y menor percolación. Este comportamiento es coherente con la baja conductividad hidráulica del horizonte Bt argílico de los Argiudoles Típicos (<0,03 cm/h).

5.4 Límite de desecamiento (LD)

El modelo incorpora un umbral de desecamiento mínimo que impide que el almacenaje caiga por debajo del agua retenida a tensiones que la planta no puede superar. Se calcula según la formulación ORA:

$$LD = \max(0, \min(1, (PMP/CC - 0,40) \times 2,5))$$

$$alMin = LD \times PMP$$

6. Fuentes de Datos Meteorológicos

6.1 Datos en tiempo real — Estación Davis WeatherLink

Los datos meteorológicos diarios de la campaña actual y las siguientes se obtienen de la estación automática Davis Instruments instalada en el campo de la Estancia El Jabalí S.A. (Tandil, Buenos Aires), a través de la API WeatherLink v2 (Davis Instruments). Los datos se actualizan a diario mediante un servidor local que firma cada consulta con HMAC-SHA256, almacena el histórico de campaña y lo entrega al dashboard en formato JSON.

Variable	Fuente	Detalle
Temperatura máx./mín. (°C)	Est. Davis — El Jabalí (Tandil)	Estación Davis WeatherLink instalada en el campo. Registro diario.
Humedad relativa (%)	Est. Davis — El Jabalí (Tandil)	Sensor capacitivo Davis. Promedio diario.
Velocidad del viento (m/s)	Est. Davis — El Jabalí (Tandil)	Anemómetro Davis. Datos en km/h convertidos a m/s.
Radiación solar (MJ/m²/día)	Est. Davis — El Jabalí (Tandil)	Piranómetro. Alternativa Hargreaves si no disponible.
Precipitación (mm)	Est. Davis — El Jabalí (Tandil)	Pluviómetro. Acumulado diario.
Histórico 2000–2025	Est. Meteo — EEA INTA Balcarce	26 años de datos de la EEA INTA Balcarce para percentiles P25/P75/Min histórico.
Kc por estadio fenológico	Plataforma ORA — INTA	Tablas Basualdo cargadas desde el archivo Excel.

6.2 Base histórica — Intervalo Normal y mínimo histórico

Para contextualizar el estado hídrico actual, se cuenta con datos meteorológicos diarios de 26 años (2000–2025) de la estación meteorológica de la EEA INTA Balcarce. Si bien la estación operativa de la estancia se encuentra en Tandil, la base histórica proviene de Balcarce por ser la serie de largo plazo más completa y representativa del Sudeste Bonaerense disponible en la región. Se realizó una simulación del balance hídrico para cada cultivo y año, calculando en cada DAP el percentil 25 (P25), el percentil 75 (P75) y el valor mínimo histórico del almacenaje.

Estos indicadores se representan en el gráfico de seguimiento como: (a) Intervalo Normal (banda P25–P75): rango dentro del cual se encontró el suelo en el 50 % central de los años; y (b) Mínimo histórico: el caso más seco registrado en los 26 años de simulación para ese DAP.

La simulación histórica emplea exactamente el mismo modelo de balance que el seguimiento en tiempo real, garantizando consistencia metodológica. El estado hídrico inicial de cada año histórico se obtiene corriendo el balance desde el 1° de enero (desde CC) hasta la fecha de siembra, reflejando las condiciones típicas del suelo para cada época del año.

7. Parámetros Configurables del Sistema

Todos los parámetros del modelo son editables por el usuario a través del archivo de configuración Balance_Hidrico_Config.xlsx. Este diseño permite adaptar el modelo a distintas situaciones de lote, cultivo o campaña sin modificar el código del sistema:

Parámetro	Hoja Excel	Valor actual	Descripción
Fecha de siembra	Cultivos	Variable por campaña	Fecha de inicio. Define el eje temporal del gráfico.
Activo (Sí/No)	Cultivos	Por cultivo	Activa/desactiva cada cultivo en el dashboard.
CC_mm	Suelo	340–476 mm	Capacidad de campo por cultivo. Escalada con profundidad radicular.
PMP_mm	Suelo	188–263 mm	Punto de marchitez permanente. Escalado con profundidad radicular.
Agua_Inicial_mm	Suelo	~89 % de CC	Contenido hídrico al momento de siembra. Ajustable por lote e historial.
Umbral_Alerta_pct	Suelo	40 %	% de agua útil consumida que activa la alerta amarilla en el dashboard.
CE (coef. escurrimiento)	Suelo	0,40	Parámetro Warrilow: 0 = sin escurrimiento, 1 = suelo impermeable.
Arcilla_pct	Suelo	33 %	Textura del suelo. Determina el coeficiente de percolación profunda (CP).
Kc por estadio	Kc_Cultivo	Tablas ORA-INTA	Kc en cada fenofase. Interpolación lineal entre estadios.
PC_Def_DAP_Ini / Fin	Cultivos	Por cultivo	DAP inicio y fin del período crítico de déficit

			(banda amarilla).
PC_Exc_DAP_Ini / Fin	Cultivos	Por cultivo	DAP inicio y fin del período crítico de exceso (banda celeste).

El archivo Excel contiene las hojas: Cultivos, Suelo, Kc_[Cultivo] (una por especie) e Hist_[Cultivo] (percentiles históricos por DAP).

7.1 Períodos críticos de sensibilidad hídrica

Para cada cultivo se definen períodos de alta sensibilidad al estrés hídrico (déficit o exceso). Durante estos períodos el gráfico muestra una banda de alerta coloreada, siguiendo la convención visual de ORA. Valores de referencia por especie:

- **Trigo / Cebada:** déficit DAP 90–130 (encañazón a antesis).
- **Soja:** déficit DAP 50–100 (floración a llenado de granos R1–R6).
- **Maíz:** déficit DAP 45–90 (el período más crítico de los cultivos estivales).
- **Girasol:** déficit DAP 40–80 (botón floral a inicio de llenado).

8. Supuestos y Limitaciones del Modelo

- **Suelo homogéneo:** se asumen propiedades hidráulicas constantes en todo el perfil radicular. El horizonte Bt puede presentar valores ligeramente distintos, y su conductividad hidráulica saturada es significativamente menor.
- **Profundidad radicular fija:** se usa la profundidad máxima esperada para cada especie. En suelos con compactación, hardpan o limitantes químicas, la profundidad real puede ser menor.
- **Agua inicial parametrizada:** el contenido hídrico al momento de la siembra se configura como valor único. En lotes con doble cultivo o antecedente de riego, puede diferir del valor por defecto.
- **Coefficiente de escurrimiento fijo (CE):** representa condiciones promedio de superficie. En lotes con alta cobertura de rastrojo o SD consolidada, el escurrimiento real puede ser menor.
- **Una sola estación meteorológica:** el modelo usa datos de la EEA INTA Balcarce. Las lluvias convectivas de verano pueden presentar alta variabilidad espacial no capturada por una única estación.
- **Histórico de 26 años (2000–2025):** el Intervalo Normal no captura eventos extremos anteriores a ese período. Ampliar la base histórica mejoraría la robustez del percentil mínimo.
- **Kc regionales:** los coeficientes ORA-INTA son representativos de la región Pampeana pero no discriminan entre variedades con diferente ciclo o arquitectura foliar.

9. Referencias Bibliográficas

Autor / Año	Referencia
Allen et al. (1998)	Crop evapotranspiration — Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Roma.
Angelini et al. (2022)	Expansión del riego: tipo de suelo, pendiente y calidad de agua en el Sudeste Bonaerense. Revista de la Facultad de Agronomía UNLP, 121(1). DOI: 10.24215/16699513e088.
Basualdo / ORA-INTA	Metodología de Balance Hídrico de Cultivos. Plataforma ORA — Oficina de Riesgo Agropecuario. INTA, Buenos Aires.
Castiglioni et al. (2007)	Movimiento del agua en Argiudoles de la Pampa Ondulada con diferente mineralogía de arcillas. Ciencia del Suelo, 25(2), 109–121.
Noilhan & Lacarrere (1995)	GCM grid-scale evaporation from mesoscale modelling. Journal of Climate, 8(2), 206–223.
Warrilow et al. (1986)	The Parametrization of Land Surface Processes in the UK Meteorological Office General Circulation Model. UKMO Technical Note, RTNMC 92.

