
Reporte de Actividad 3.2.4

Actualización del modelo hidrológico con
escenarios simulados de implementación
de tecnologías de UEA

Proyecto

C-INV-AG-007

Modelación hidrológica de cuencas incorporando las mejores
prácticas agrícolas en el cultivo de palma de aceite

Autores

Andrea Zabala
Carlos Ricardo Bojacá

Área de Geomática

Cenipalma

Septiembre 2026

1. Introducción

La actividad 3.2.4 consolida los resultados de las actividades 3.2.1 a 3.2.3 en un paquete de actualización del modelo hidrológico del proyecto. Su producto es el conjunto de tablas, parámetros y documentación necesario para que los escenarios de implementación de tecnologías de uso eficiente del agua (UEA) queden incorporados de forma permanente en el modelo, y para que la simulación pueda ser reproducida, auditada o extendida por terceros.

El modelo hidrológico del proyecto, desarrollado con HydroBID en las actividades 2.1.1 a 2.1.4 y explotado en las actividades 2.2.1 a 2.2.3 y 2.3.1 a 2.3.3, genera la oferta hídrica de las cuencas mediante el modelo lluvia-escurrimiento. Los escenarios de UEA no modifican esa componente: la mejora de la eficiencia del riego actúa sobre la demanda y sobre los flujos de retorno, no sobre la generación de escurrimiento. En consecuencia, la actualización del modelo consiste en la incorporación de las tablas de uso de agua diferenciadas por escenario, que alimentan el módulo de balance y asignación.

2. Alcance de la actualización

La actualización comprende cuatro componentes:

1. **Configuración de escenarios.** Los parámetros que definen cada escenario: eficiencia global objetivo, rango de eficiencia, eficiencia de línea base, fracción recuperable del retorno con su banda de incertidumbre y factor de caudal ecológico.
2. **Tablas de uso de agua.** Para cada escenario, la extracción, el retorno y el consumo neto por subcuenca COMID y mes, en el formato requerido por el módulo de balance de HydroBID.
3. **Base de datos consolidada de resultados.** Los indicadores hidrológicos derivados por subcuenca y escenario: IUA, déficit, vulnerabilidad, ahorro por hectárea e índice de prioridad.
4. **Documentación y verificación.** Diccionario de datos, manifiesto del paquete y registro de las verificaciones de integridad ejecutadas.

2.1. Alcance y supuestos

- **Balance local, sin enrutamiento hidráulico.** Las tablas de uso de agua describen la extracción, el retorno y el consumo por subcuenca y mes; el paquete no simula el tránsito del retorno por la red en el tiempo, sino que lo descuenta en el mismo mes y en el mismo COMID donde se genera.
- **Sin aguas subterráneas.** El modelo actualizado, al igual que las actividades que lo alimentan, no contabiliza el aporte de acuíferos ni las extracciones subterráneas; los indicadores de presión hídrica se refieren exclusivamente a la oferta superficial.
- **Demanda climatológica.** El perfil de captación y retorno es un promedio multianual aplicado de forma uniforme al período de referencia 1985-2023, sin variabilidad interanual de la demanda.
- **Metas uniformes.** Cada escenario aplica la misma eficiencia global a toda la superficie de palma de las tres cuencas, porque la composición real de sistemas de riego por subcuenca no está disponible en la base de datos del proyecto.
- **Fracción recuperable con gradiente impuesto.** La fracción del retorno que vuelve a la red superficial o al acuífero dulce se adopta de la literatura de contabilidad del agua de riego (Van

Opstal et al., 2025; Whiting et al., 2023; Grafton et al., 2018), con banda de incertidumbre, y se modula con un gradiente por zona longitudinal impuesto por el marco, no estimado a partir de datos de las tres cuencas. El resultado de Delphy et al. (2021) para Arosevilla se usa sólo como contraste.

3. Configuración de escenarios incorporada

Tabla 1: Parámetros de configuración de los escenarios en el modelo actualizado

Escenario	Descripción	E_{global}	Reducción	Fuente de la meta
Base	Línea base (situación actual)	34.1 %		Situación actual (eficiencia de la demanda de palma, Zonificación)
E1	E1 · Mejora de sistemas superficiales	50.0 %	31.9 %	Escenario 1 · Reporte 3.1.2
E2	E2 · Optimización integral del riego	55.0 %	38.1 %	Escenario 2 · Reporte 3.1.2
E3	E3 · Riego tecnificado + manejo suelo	65.0 %	47.6 %	Escenario 3 · Reporte 3.1.2

Los parámetros globales del modelo actualizado son la eficiencia de línea base por cuenca (0.39 en Frío-Sevilla y 0.32 en Aracataca-Tucurín y Fundación, con equivalente global $E_{\text{base}} = 0.341$), la fracción recuperable del retorno $\varphi = 0.50$, con banda de incertidumbre de 0.40 a 0.65 (con valores por zona de 0.528, 0.503 y 0.478 para las partes alta, media y baja), el factor de caudal ecológico del 25 % de la Resolución 865 de 2004 (adoptada por CORPAMAG), y el período climático de referencia 1985-2023.

4. Estructura de las tablas de uso de agua

Las tablas de uso de agua se generan en formato CSV, uno por escenario, más un archivo adicional con los sectores no intervenidos. Cada registro corresponde a la combinación de una subcuenca COMID y un mes, con 15 campos: identificación de la subcuenca, la cuenca, la zona, el mes y el sector; el área sembrada; los tres flujos de captación (extracción bruta, retorno y consumo neto); sus derivados (retorno recuperable y extracción neta); las mismas extracciones expresadas como caudal medio del mes; y la eficiencia global aplicada.

La relación fundamental que satisfacen todos los registros es el cierre del balance de la captación:

$$\text{Extraccion_m3} = \text{Consumo_neto_m3} + \text{Retorno_m3} \quad (1)$$

y la definición de la extracción neta:

$$\text{Extraccion_neta_m3} = \text{Extraccion_m3} - \text{Retorno_recuperable_m3} \quad (2)$$

Ambas se verifican explícitamente durante la generación del paquete.

Tabla de extracción mensual cargada en el modelo, por escenario

Volumen de captación bruta para riego de palma de aceite

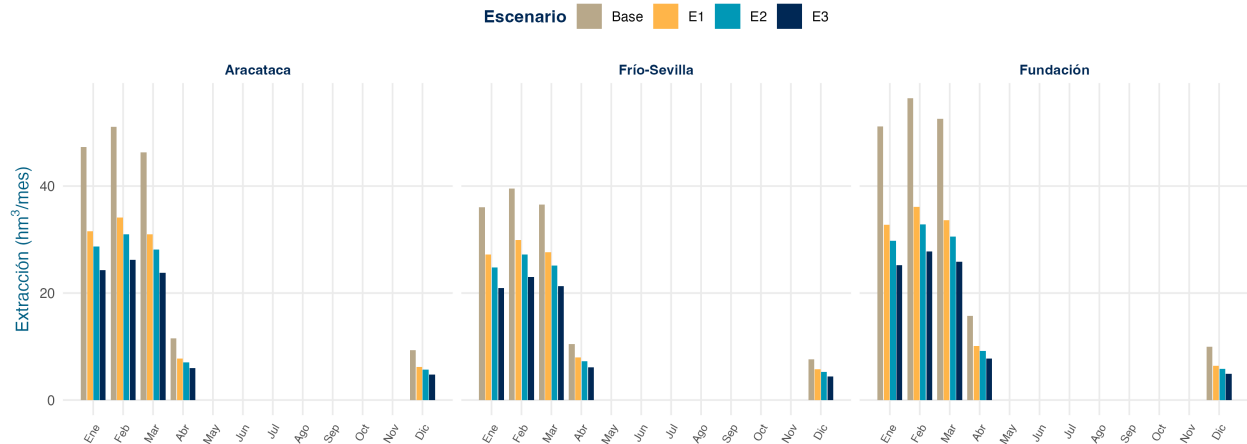


Figura 1: Tabla de extracción mensual incorporada al modelo, agregada por cuenca y escenario.

Estructura del uso del agua de riego por cuenca y escenario

Descomposición de la captación bruta en el modelo actualizado

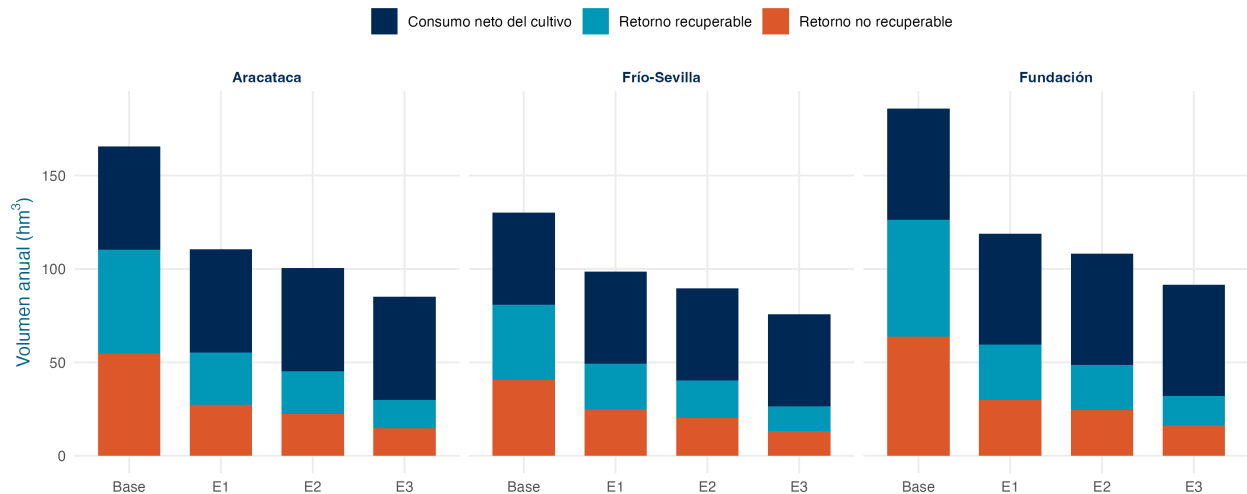


Figura 2: Estructura del uso del agua de riego en el modelo actualizado. La reducción de la captación se produce íntegramente sobre la componente de retorno.

5. Base de datos consolidada de resultados

Junto con las tablas de uso de agua, el paquete incorpora una base consolidada con los indicadores hidrológicos derivados por subcuenca y escenario (112 registros, 28 COMID $\times$ 4 escenarios), documentada en el siguiente diccionario de datos.

Tabla 2: Diccionario de campos de la base de datos consolidada de resultados

Campo	Unidad	Descripción
escenario	-	Identificador del escenario (Base, E1, E2, E3)
comid	-	Identificador de la subcuenca en la red AHD de HydroBID
cuenca	-	Cuenca hidrográfica (Aracataca, Frío-Sevilla, Fundación)
zona	-	Posición longitudinal en la cuenca (Alta, Media, Baja)
area_palma_ha	ha	Área sembrada en palma de aceite dentro del COMID
phi	fracción	Fracción recuperable del retorno de riego (vuelve a la red superficial o al acuífero dulce)
W_hm3_anual	hm3/año	Captación bruta de riego (extracción en el predio)
R_hm3_anual	hm3/año	Retorno de riego (percolación, drenaje y escorrentía)
ET_hm3_anual	hm3/año	Consumo neto del cultivo; invariante entre escenarios
N_hm3_anual	hm3/año	Captación neta sobre la red tras descontar el retorno recuperable
W_m3s	m3/s	Captación bruta expresada como caudal medio anual
N_m3s	m3/s	Captación neta expresada como caudal medio anual
lamina_bruta_mm	mm/año	Lámina bruta de riego aplicada por hectárea
IUA_medio	%	Índice de Uso del Agua medio anual (IDEAM, ENA 2022)
IUA_seco	%	IUA medio de los meses de temporada seca (dic-abr)
meses_criticos	meses/año	Meses al año con IUA >50 % (Muy alto o Crítico, ENA 2022)
deficit_hm3	hm3/año	Volumen anual de demanda no satisfecha
nivel_vulnerabilidad	-	Clasificación de vulnerabilidad hídrica de la subcuenca
ahorro_real_m3ha_E3	m3/ha/año	Ahorro real por hectárea bajo el escenario E3
indice_prioridad	0-1	Índice de priorización para la implementación

6. Verificaciones de integridad

El paquete incorpora una batería de verificaciones que se ejecutan durante su generación y detienen el proceso ante cualquier inconsistencia.

Tabla 3: Verificaciones de integridad del paquete de actualización

Verificación	Detalle	Estado
Completitud de la tabla de uso de agua	1344 registros de 1344 esperados (4 escenarios x 28 COMIDs x 12 meses)	OK
Sin valores faltantes en los flujos	Ningún registro con extracción bruta o neta ausente	OK
Balance de masa: extracción = consumo + retorno	Error máximo de cierre: 1.00 m3/mes	OK
Consumo neto invariante entre escenarios	El consumo del cultivo no varía al cambiar la eficiencia del riego	OK
Monotonía: mayor eficiencia implica menor captación	La captación decrece de forma estricta de Base a E3	OK
Extracción neta no supera la extracción bruta	La captación neta es siempre menor o igual a la bruta	OK
Identidad algebraica: reducción de $E3 = 1 - Ef_base/Ef_E3$	Reducción de E3: 47.6% con Ef_base equivalente 0.341 (Findeter, Alternativa 0: 40% con Ef_base 0.39)	OK
Fracción recuperable: media ponderada igual a phi y dentro de la banda	phi = 0.50 (Van Opstal et al. 2025; REWAS), banda 0.40-0.65; Delphy	OK

Las 10 verificaciones son **comprobaciones internas**: constatan que el código construye correctamente el balance de masa, la completitud de la tabla, la invarianza del consumo del cultivo y la monotonía de la captación entre escenarios, y pueden fallar si el código es incorrecto. Entre ellas figuran la identidad algebraica de la reducción de captación, $1 - E_{\text{base}}/E_e$, y la comprobación de que la media ponderada de la fracción recuperable por COMID es igual al valor adoptado y queda dentro de su banda; el detalle de esta última registra, como contraste, el valor de φ que implicaría el resultado de Delphy et al. (2021). Ninguna verificación ajusta parámetros a fuentes externas. Todas las verificaciones fueron superadas.

7. Síntesis de los resultados incorporados

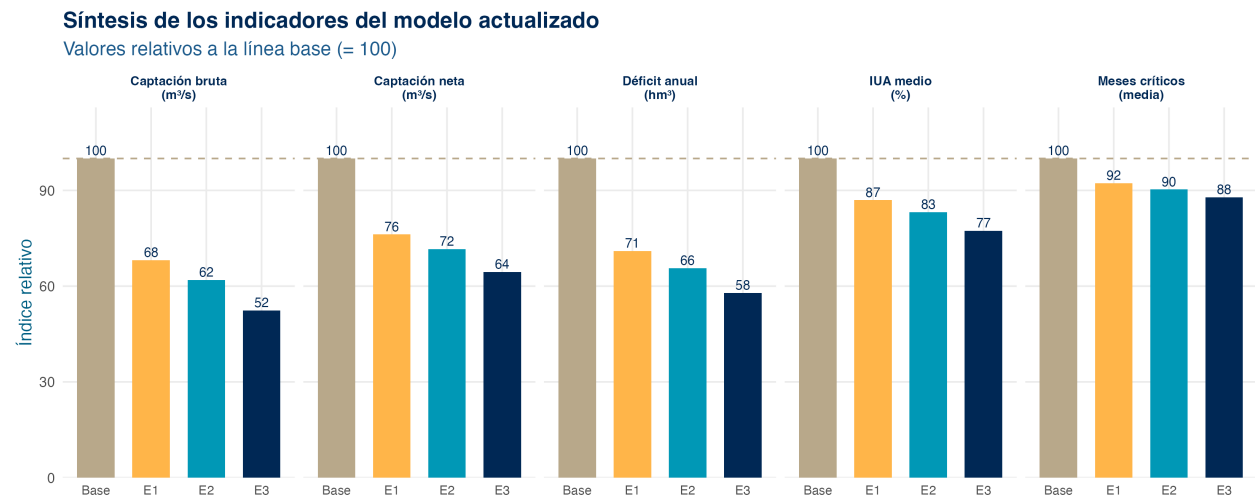


Figura 3: Síntesis de los indicadores del modelo actualizado, expresados como índice relativo a la línea base.

Tabla 4: Resumen de los resultados incorporados al modelo

Indicador	Base	E1	E2	E3
Captación bruta (m³/s)	15.26	10.40	9.45	8.00
Captación neta (m³/s)	10.23	7.79	7.32	6.60
Déficit hídrico total (hm³/año)	95.46	66.81	61.66	54.08
Caudal adicional liberado (m³/s)		2.44	2.91	3.63
Ahorro aparente		31.9 %	38.1 %	47.6 %
Ahorro real		23.8 %	28.4 %	35.5 %
Subcuencas que cambian de categoría IUA		2	4	5
Subcuencas que cambian de vulnerabilidad		4	6	7

Todos los cambios de categoría de IUA y de nivel de vulnerabilidad observados entre la línea base y cada escenario son mejoras de un solo escalón, consistentes con el hallazgo de la actividad 3.2.2: los escenarios alivian la presión hídrica en el margen, y bajo E3 sólo 1 de las 7 subcuencas en categoría Crítico sale de ella.

8. Contenido del paquete

Tabla 5: Archivos que componen el paquete de actualización del modelo

Archivo	kB	Contenido
bd_escenarios_comid.csv	33.7	Base consolidada de resultados por subcuenca
bd_escenarios_comid.parquet	31.4	Idem, formato columnar
config_escenarios.csv	1.4	Parámetros de configuración de los cuatro escenarios
diccionario_datos.csv	1.6	Descripción de los campos de la base consolidada
hydrobid_uso_agua_Base.csv	33.6	Tabla de uso de agua de la línea base
hydrobid_uso_agua_E1.csv	31.9	Tabla de uso de agua del escenario E1
hydrobid_uso_agua_E2.csv	32.2	Tabla de uso de agua del escenario E2
hydrobid_uso_agua_E3.csv	32.1	Tabla de uso de agua del escenario E3
hydrobid_uso_agua_sectores_fijos.csv	12.3	Demanda de banano/plátano y doméstica, invariante entre escenarios
hydrobid_uso_agua_todos_escenarios.parquet	185.9	Los cuatro escenarios en un único archivo columnar
verificaciones_integridad.csv	1.2	Registro de las verificaciones ejecutadas

9. Protocolo de reproducción y actualización

El paquete se regenera íntegramente ejecutando los guiones de la carpeta `actividad_3_2` en el siguiente orden, desde el directorio de cada actividad:

1. `3_2_1/analisis_321.R`: simulación de los escenarios
2. `3_2_2/analisis_322.R`: balance hídrico e indicadores de vulnerabilidad
3. `3_2_3/analisis_323.R`: indicadores de eficiencia, sensibilidad y priorización
4. `3_2_4/analisis_324.R`: generación del paquete y verificaciones

Todos cargan el módulo compartido `00_escenarios_comun.R`, que a su vez toma de `00_comid_comun.R` la eficiencia de línea base, la topología de la red y la demanda por COMID, y concentra las rutas, los parámetros del marco de escenarios y la función de simulación. Los guiones `figuras_32x.R` regeneran las figuras de cada reporte.

Para actualizar el modelo ante nueva información, los puntos de intervención son los siguientes:

- **Nuevas metas de eficiencia o escenarios adicionales:** modificar la tabla `escenarios` en `00_escenarios_comun.R`. La simulación, el balance y el paquete se propagan automáticamente.

- **Revisión de la eficiencia de línea base:** modificar el vector EF_BASE_CUENCA en 00_comid_comun.R y regenerar la demanda de palma con Usuarios/demanda_palma_eto_palmet.R; EF_BASE se recalcula como su equivalente ponderado por la captación. Estos archivos los comparten todas las actividades 3.2.1 a 3.2.4.
- **Mediciones directas de caudales de retorno:** sustituir el valor adoptado PHI_REC y su banda PHI_BANDA en 00_comid_comun.R por la fracción recuperable que arrojen las mediciones propias del destino de los retornos (red superficial, acuífero dulce o ciénaga); el mismo valor rige la demanda neta de palma de la actividad 2.3.3. Esta es la actualización de mayor impacto sobre los resultados, según demuestra el análisis de sensibilidad de la actividad 3.2.3.
- **Actualización de la demanda de riego:** reemplazar el archivo Usuarios/comid_demanda_agricola.csv. El módulo agrega automáticamente los polígonos múltiples por COMID y promedia los años disponibles.
- **Extensión del período hidrológico:** regenerar las series de la actividad 2.2.2. El módulo toma el período directamente del archivo de series.

10. Limitaciones del modelo actualizado

El modelo actualizado hereda las limitaciones documentadas en las actividades precedentes, que se recogen aquí de forma consolidada por su relevancia para el uso posterior del paquete.

La incertidumbre dominante es la fracción recuperable del retorno. Se adopta de revisiones y casos de la literatura internacional, no de mediciones en las tres cuencas; el análisis de sensibilidad de la actividad 3.2.3 cuantifica el rango de ahorro real resultante dentro de la banda adoptada y frente al valor que implicaría el estudio de Asosevilla.

El balance se construye de forma local por subcuenca, sin enrutamiento hidráulico de las extracciones a lo largo de la red ni de los retornos en el tiempo: el retorno se descuenta en el mismo mes y en el mismo COMID donde se genera. Los valores de IUA deben interpretarse como indicadores de presión local, no como el resultado de un modelo de asignación completo. Tampoco se contabiliza el aporte de aguas subterráneas, que en la Zona Bananera y en los acueductos municipales puede ser relevante.

La demanda de riego se representa mediante un perfil climatológico aplicado uniformemente sobre el período de referencia, por lo que no captura la respuesta de la demanda a las condiciones climáticas de cada año. Finalmente, las metas de eficiencia se aplican de forma homogénea sobre toda la superficie de palma, al no disponerse de la composición real de sistemas de riego por subcuenca.

11. Conclusiones

El modelo hidrológico del proyecto queda actualizado con los tres escenarios de implementación de tecnologías de uso eficiente del agua definidos en la actividad 3.1.2, incorporados como tablas de uso de agua por subcuenca y mes, junto con la base consolidada de resultados y su documentación.

El paquete supera las 10 verificaciones de integridad ejecutadas durante su generación, todas ellas comprobaciones internas; la fracción recuperable φ se adopta de la literatura y no se ajusta a ningún resultado externo. La reducción de captación del escenario E3, de 47.6 %, difiere de la que Findeter atribuye a su Alternativa 0 porque el marco parte de una eficiencia de línea base equivalente de 0.341.

Los resultados incorporados indican que la implementación plena del escenario más ambicioso reduce la captación bruta de riego de palma de 15.26 a 8.00 m³/s y libera 3.63 m³/s de caudal adicional para las tres cuencas; de las 7 subcuencas estratégicas en categoría Crítico del IUA en la línea base, 6 permanecen en ella. El modelo actualizado permite explorar variantes de estas conclusiones modificando los parámetros documentados en el protocolo de actualización.

Referencias

- Delgado, T. (2026). *Definición de escenarios de mejora de prácticas de aprovechamiento óptimo del recurso hídrico*. Reporte de actividad 3.1.2, Proyecto C-INV-AG-007. Cenipalma.
- Demmink, L., Lugtenburg, C., Kaune, A., Goretti, M., Pérez, C., Delgado, T., & Arias, N. A. (2021). *Increasing water efficiency in Colombian palm oil production by implementing efficient irrigation systems. Final report*. Delphy, FutureWater, Solidaridad, Cenipalma.
- Findeter, Asbama, Fedepalma. (2017-2018). *Diagnóstico hídrico para soluciones multipropósito en la región centro y norte del departamento del Magdalena. Agua para la Paz*.
- Grafton, R. Q., Williams, J., Perry, C. J., Molle, F., Ringler, C., Steduto, P., Udall, B., Wheeler, S. A., Wang, Y., Garrick, D., & Allen, R. G. (2018). The paradox of irrigation efficiency. *Science*, 361(6404), 748-750.
- Inter-American Development Bank. *HydroBID: simulation tool for water resources management and planning in Latin America and the Caribbean*.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2004). *Resolución 865 de 2004, por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales*. Numeral 3.4.2, caudal mínimo ecológico.
- Van Opstal, J., Droogers, P., & Kaune, A. (2025). *Reuse of water in agricultural systems. Follow the Water*. FAO, Bangkok. <https://doi.org/10.4060/cd6520en>
- Whiting, L., Turrall, H., & Droogers, P. (2023). *Real water savings in agriculture*. Next Generation Water Management Policy Briefs 1. FAO, Bangkok.
- Zabala, A., & Bojacá, C. R. (2026). *Calibración y validación del modelo HydroBID*. Reporte de actividad 2.1.4, Proyecto C-INV-AG-007. Cenipalma.
- Zabala, A., & Bojacá, C. R. (2026). *Evaluación de eficiencia de los escenarios optimizados del uso del recurso hídrico*. Reporte de actividad 3.2.3, Proyecto C-INV-AG-007. Cenipalma.