
Reporte de Actividad 3.2.1

Simulación de escenarios definidos para
optimizar el uso del recurso hídrico

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 3.2.1 inicia el objetivo 3.2 del proyecto C-INV-AG-007, orientado a construir un modelo hidrológico con escenarios simulados de implementación de tecnologías de uso eficiente del agua (UEA) en el cultivo de palma de aceite. Su propósito es traducir los tres escenarios de mejora formulados en la actividad 3.1.2 en parámetros cuantitativos de entrada, y simular su efecto sobre la captación de agua para riego en las cuencas de los ríos Aracataca, Frío-Sevilla y Fundación.

Las actividades precedentes aportan los insumos necesarios. La actividad 2.2.2 generó las series diarias de caudal simuladas con HydroBID para el período de 1985 a 2023 en los 28 COMID estratégicos; la actividad 2.2.3 estructuró la base de datos de comportamiento hidrológico; la actividad 2.3.1 cuantificó la oferta hídrica neta descontando el caudal ecológico; y la actividad 3.1.2 definió los escenarios de mejora con su respectivo soporte técnico. Esta actividad articula esos productos en un marco de simulación reproducible.

El resultado central de la actividad es la distinción explícita, exigida por el reporte 3.1.2, entre el **ahorro aparente** de agua, medido en el predio, y el **ahorro real** a escala de cuenca. Esta distinción resulta determinante para la interpretación de los escenarios y condiciona todas las conclusiones de las actividades 3.2.2 y 3.2.3.

2. Metodología

2.1. Alcance y supuestos

El marco de simulación se construye sobre los siguientes supuestos, que delimitan lo que los resultados representan y lo que no:

- **Eficiencia de línea base por cuenca.** Se adopta la eficiencia de riego con la que se calculó la demanda bruta de palma en cada cuenca: 0.39 en Frío-Sevilla y 0.32 en Aracataca-Tucurín y Fundación. Su equivalente global, ponderado por la captación, es $E_{base} = 0.341$. El valor de 0.39 implícito en el balance regional de Findeter coincide con el de Frío-Sevilla y se emplea como contraste uniforme en la actividad 3.2.3.
- **Superficie y demanda de palma.** El área y la demanda bruta por COMID son el promedio de las coberturas Corine Land Cover de 2018, 2020 y 2022, intersectadas geométricamente con las subcuencas. El perfil mensual es climatológico: no incorpora la variabilidad interanual de la demanda ni su respuesta al clima de cada año.
- **Fracción recuperable del retorno φ .** Se adopta $\varphi = 0.50$ a partir de la literatura de contabilidad del agua de riego (Van Opstal et al., 2021 y 2025; Whiting et al., 2023; Grafton et al., 2018), con una banda de incertidumbre de 0.40 a 0.65; no se mide en las cuencas de estudio. Se modula con un gradiente por zona longitudinal impuesto por el marco, no estimado. El estudio de Delphy et al. (2021) en Arosevilla se emplea como contraste.
- **Metas uniformes.** Cada escenario aplica la misma eficiencia global a toda la superficie de palma, porque la composición de sistemas de riego por subcuenca no está disponible en la base de datos del proyecto.
- **Balance de cuenca (actividad 3.2.2).** La demanda que se confronta con el caudal enrutado es la acumulada aguas arriba sobre los 54 COMIDs del dominio; la oferta disponible descuenta el caudal ecológico de la Resolución 865 de 2004; el Índice de Uso del Agua sigue la escala del ENA 2022 y se refiere a la oferta superficial. La demanda de palma entra como demanda neta

del retorno recuperable, igual que en la actividad 2.3.3. No se consideran aguas subterráneas ni el enrutamiento temporal de los retornos.

2.2. Definición operativa de los escenarios

El reporte 3.1.2 formula tres escenarios de incremento de la eficiencia del uso del agua. Sus metas se interpretan como **niveles de eficiencia global del riego alcanzados**, entendida esta como el producto de las eficiencias de conducción, distribución y aplicación. Esta interpretación es la que emplea el estudio de Findeter, Asbama y Fedepalma (2017-2018) al formular su “Alternativa 0” y la que hace comparables las metas con los valores de eficiencia de aplicación medidos en campo por Cenipalma.

La eficiencia de la línea base es la misma con la que se calculó la demanda bruta de riego de palma del proyecto: el balance hídrico del cultivo convierte el requerimiento neto en demanda bruta con una eficiencia de riego de 0.39 en Frío-Sevilla y de 0.32 en Aracataca-Tucurín y Fundación. Son eficiencias globales estimadas por cuenca que aproximan la mezcla de sistemas de riego presentes en cada una; no corresponden a un sistema de riego en particular. Adoptar esos mismos valores en cada COMID garantiza que el consumo neto del cultivo que se deduce de la demanda bruta, $ET = E_{base} \times W_{base}$, sea una identidad de la fuente y no un supuesto adicional. Para un COMID que recibe palma de dos cuencas, su eficiencia es el promedio ponderado por la captación de cada una, y el equivalente global $E_{base} = \sum ET / \sum W_{base} = 0.341$ es el que rige las reducciones agregadas.

Como referencia de contraste, el balance regional de Findeter implica una eficiencia de línea base distinta: dicho estudio establece que llevar la eficiencia global al 65 % reduce la demanda de riego de 70 a 42 m³/s, lo que equivale a $E_{base} = 0.65 \times 42/70 = 0.39$. Ese valor es un cociente despejado de un balance regional y no una medición; la actividad 3.2.3 cuantifica qué cambia si se adoptara.

Tabla 1: Definición operativa de los escenarios simulados

Escenario	Estrategia técnica central	E_{global}	Rango	Reducción
Base	Situación actual	34.1 %		
E1	Mejora de sistemas superficiales	50.0 %		31.9 %
E2	Optimización integral del riego	55.0 %	50 % a 60 %	38.1 %
E3	Tecnificación, sensores y manejo de suelo	65.0 %	60 % a 70 %	47.6 %

La reducción indicada corresponde a la disminución de la captación bruta respecto a la línea base, $1 - E_{base}/E_e$. Con $E_{base} = 0.34$, el escenario E3 reduce la captación bruta en 47.6 %; la reducción del 40 % que Findeter atribuye a su Alternativa 0 se obtiene sólo con $E_{base} = 0.39$, y por tanto no constituye una verificación del marco sino una consecuencia algebraica de la eficiencia de partida que se adopte (ver la sección de comprobaciones).

2.3. Balance de la captación y modelo de retornos

La mejora de la eficiencia reduce la captación bruta, pero no altera el consumo neto del cultivo, que depende de su demanda evapotranspirativa y del rendimiento objetivo. Para cada subcuenca COMID i y mes m :

$$ET_{i,m} = W_{i,m}^{\text{base}} \times E_{\text{base}} \quad (\text{invariante entre escenarios}) \quad (1)$$

$$W_{i,m}^e = \frac{ET_{i,m}}{E_e} \quad (2)$$

$$R_{i,m}^e = W_{i,m}^e - ET_{i,m} \quad (3)$$

donde W es la captación bruta, ET el consumo neto del cultivo y R el retorno de riego, compuesto por la percolación, el drenaje superficial y la escorrentía que abandonan el predio.

Del agua captada y no consumida por el cultivo, una parte regresa a la red superficial o al acuífero dulce y sigue disponible para otros usos aguas abajo; el resto abandona el sistema aprovechable. Esta distinción entre retorno recuperable y no recuperable es la base del marco de contabilidad del agua de riego de la FAO (Van Opstal et al., 2021) y del análisis de Grafton et al. (2018) sobre la paradoja de la eficiencia de riego. En consecuencia, la presión efectiva que cada predio ejerce sobre la cuenca no es su captación bruta, sino su **captación neta**:

$$N_{i,m}^e = W_{i,m}^e - \varphi_i R_{i,m}^e \quad (4)$$

donde $\varphi_i \in [0, 1]$ es la **fracción recuperable del retorno**: la parte de R que vuelve a la red superficial o al acuífero dulce y sigue disponible aguas abajo. El complemento $(1 - \varphi_i)$ representa las pérdidas no recuperables: drenaje hacia el sistema cenagoso terminal, percolación a acuíferos salobres y evaporación no benéfica en la conducción. El ahorro real depende de esta fracción no recuperable y no de que el agua recuperable sea efectivamente captada por otro usuario.

Sustituyendo $W = ET + R$ en la definición de la captación neta se obtiene una identidad que gobierna todo el comportamiento del modelo:

$$N_{i,m}^e = ET_{i,m} + (1 - \varphi_i) R_{i,m}^e \quad (5)$$

Es decir, la presión que el riego ejerce sobre la cuenca se compone de solo dos términos: el consumo del cultivo, que es invariante entre escenarios, y las pérdidas no recuperables. De aquí se desprende directamente el resultado central de esta actividad:

$$N^{\text{base}} - N^e = (1 - \varphi) (R^{\text{base}} - R^e) \quad (6)$$

El ahorro real es exactamente la reducción de las pérdidas no recuperables, y nada más. No se trata de una aproximación numérica del modelo sino de una consecuencia algebraica de la conservación de masa: como el cultivo consume lo mismo bajo cualquier tecnología de riego, la única componente del balance susceptible de reducirse es la fracción del retorno que abandona definitivamente el sistema aprovechable. Con $\varphi = 0.50$, la fracción $1 - \varphi = 0.50$ de cualquier reducción del retorno se traduce en agua liberada para la cuenca; el resto ya estaba disponible aguas abajo.

2.4. Fracción recuperable del retorno

El valor de φ se adopta de la literatura y no se ajusta a ningún resultado del modelo. La revisión de la FAO sobre el reúso del agua en sistemas agrícolas (Van Opstal et al., 2025) encuentra que el retorno de riego representa típicamente entre el 30 % y el 50 % de lo captado, con un promedio del 35 %. Expresado como fracción de lo captado y no consumido, ese promedio equivale a $\varphi = 0.35/(1 - E_{\text{base}})$, es decir, de 0.51 a 0.57 con las eficiencias de línea base de las cuencas de estudio. El caso de aplicación de la herramienta REWAS de la FAO y FutureWater a escala de sistema (Whiting et al., 2023) separa el retorno recuperable del no recuperable y del consumo no

benéfico, y su línea base corresponde a $\varphi \approx 0.51$. Grafton et al. (2018) sitúan cerca de 0.6 la cota superior del retorno recuperable en riego superficial. Con estas referencias se adopta

$$\varphi = 0.50, \quad \text{banda de incertidumbre } [0.40, 0.65] \quad (7)$$

El mismo valor rige la demanda neta de palma de la actividad 2.3.3, de modo que la línea base del presente marco coincide con el balance de oferta y demanda de esa actividad.

Como contraste, Delphy et al. (2021) reportan para el distrito de Arosevilla que el paso de una eficiencia de aplicación del 25 % a una del 75 % mediante aspersión produce un ahorro aparente del 67 % en el predio y un ahorro real del 20 % a escala de cuenca. Bajo la identidad anterior, ese resultado implicaría $\varphi = 0.90$, por encima de la cota superior que Grafton et al. (2018) reportan para riego superficial; con la fracción adoptada, el mismo cambio de eficiencia daría un ahorro real del 53.3 %. La brecha es consistente con condiciones locales del distrito (topografía plana, conducción por canales y usuarios en serie sobre los mismos drenajes) que favorecen una recuperación del retorno superior a la típica; por ello ese valor se usa como contraste y no como parámetro del marco.

Sobre este valor medio se aplica un gradiente longitudinal moderado, normalizado para preservar la media ponderada adoptada, que reconoce que los retornos generados en la parte alta de la cuenca tienen más recorrido por la red aprovechable que los generados en la parte baja, cuyos drenajes descargan al sistema cenagoso terminal. Los valores resultantes son $\varphi = 0.528$ en la zona alta, 0.503 en la media y 0.478 en la baja, donde la zona de cada COMID se define por su área de drenaje acumulada (actividad 2.3.1). Este gradiente es un supuesto del marco, no un resultado estimado; su consecuencia sobre el orden de implementación se examina en la actividad 3.2.3.

2.5. Insumos y consistencia de la demanda

La demanda de riego de palma proviene de la base de datos de usuarios del proyecto, que registra el consumo mensual por COMID y cultivo para los años 2018, 2020 y 2022 a partir de la intersección geométrica de la cobertura Corine Land Cover con las subcuencas. Los registros se agregan por COMID y fecha y se promedian sobre los años disponibles, obteniendo un perfil mensual climatológico combinable con la serie de caudales de 1985 a 2023. Por tratarse de un promedio de tres coberturas, la superficie resultante, 46 252 ha en los 28 COMID estratégicos, difiere del área de la cobertura 2022 que reporta la actividad 2.2.1. Los sectores no intervenidos (banano y plátano, y demanda doméstica asignada por población dentro de la cuenca) provienen del mismo módulo de demanda por COMID y se acumulan aguas arriba junto con la palma en la actividad 3.2.2.

El resultado agregado es una captación bruta de 481.6 hm³/año, equivalente a 15.26 m³/s. En febrero, mes de máxima demanda, la captación de palma alcanza 55.9 m³/s, el 80 % de los 70 m³/s que Findeter estima para el pico de febrero en los 19 municipios de la región; aquella cifra abarca seis cuencas e incluye el banano, de modo que la comparación es sólo de orden de magnitud.

La lámina bruta media resultante es de 1 041 mm/año. Aplicando la eficiencia global de línea base se obtiene una lámina neta de 355 mm/año, que es el requerimiento neto de riego implícito en la demanda de palma del proyecto (balance hídrico de la zonificación agroclimática con evapotranspiración de referencia PALMET, método FAO-56 Penman-Monteith) para las condiciones del Magdalena.

3. Resultados

3.1. Balance agregado de las tres cuencas

Tabla 2: Balance de la captación de riego de palma por escenario, agregado para las tres cuencas de estudio

	Base	E1	E2	E3	Unidad
Captación bruta	481.6	328.1	298.2	252.3	hm ³ /año
Consumo neto del cultivo	164.0	164.0	164.0	164.0	hm ³ /año
Retorno de riego	317.5	164.0	134.2	88.3	hm ³ /año
Captación neta	322.8	246.0	231.1	208.2	hm ³ /año
Captación bruta	15.26	10.40	9.45	8.00	m ³ /s
Captación neta	10.23	7.79	7.32	6.60	m ³ /s
Ahorro aparente		31.9 %	38.1 %	47.6 %	%
Ahorro real		23.8 %	28.4 %	35.5 %	%
Ahorro real		2.44	2.91	3.63	m ³ /s

El consumo neto del cultivo permanece constante en 164.0 hm³/año en los cuatro escenarios, como exige la formulación: la mejora de la eficiencia modifica la forma en que el agua se aplica, no la cantidad que la planta transpira. La totalidad de la reducción de la captación bruta se materializa como reducción de los retornos, que caen de 317.5 hm³/año en la línea base a 88.3 hm³/año en el escenario E3.

Captación de agua para riego de palma por escenario

Tres cuencas de estudio · promedio anual · adopción total

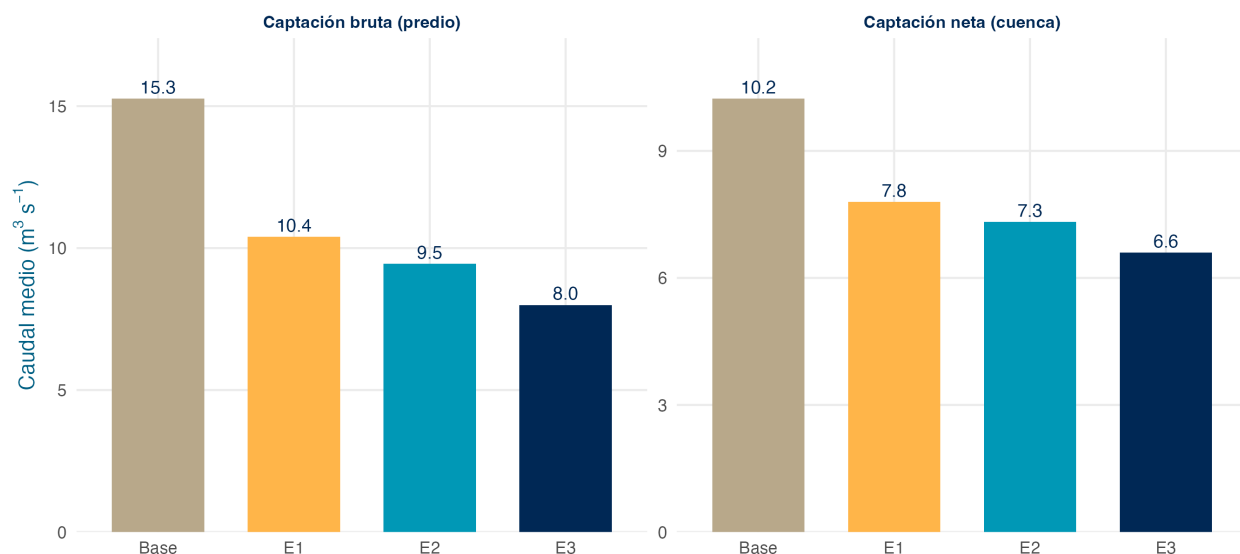


Figura 1: Captación bruta y neta de agua para riego de palma bajo cada escenario. La escala de la captación neta es sensiblemente menor y su variación entre escenarios mucho más contenida.

Destino de la captación bruta de riego por escenario

El consumo neto del cultivo permanece constante; la eficiencia reduce los retornos

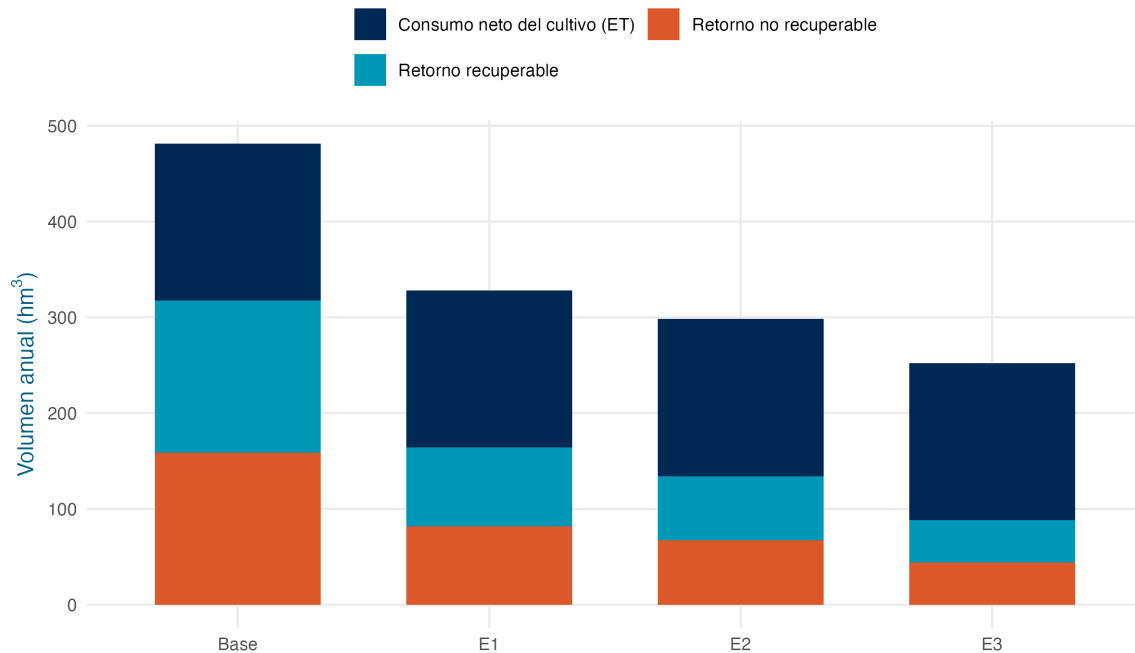


Figura 2: Destino de la captación bruta de riego. La componente que se reduce al mejorar la eficiencia es el retorno, del cual la fracción recuperable seguía disponible aguas abajo.

3.2. Ahorro aparente frente a ahorro real

Resultado central de la actividad. Bajo el escenario E3, la captación bruta de riego se reduce en un 47.6 % (de 15.26 a 8.00 m³/s), pero la presión efectiva sobre la red hídrica disminuye solo un 35.5 %, equivalente a 3.63 m³/s. La razón es que cerca del 50 % del agua “ahorrada” no se perdía: retornaba a la red superficial o al acuífero dulce y seguía disponible aguas abajo. En la banda de incertidumbre de la fracción recuperable, de 0.40 a 0.65, el ahorro real de E3 se sitúa entre 29.2 % y 38.8 %.

Este resultado no invalida los escenarios: los reformula. La tecnificación del riego sigue siendo valiosa por razones que el balance agregado no captura: reduce la presión sobre las captaciones individuales, disminuye los costos de bombeo y conducción, mejora la confiabilidad del suministro en la temporada seca y elimina el estrés hídrico documentado en el CEPS. Pero su contribución al cierre del balance hídrico regional es considerablemente menor de lo que sugiere la cifra de ahorro medida en el predio.

Ahorro aparente frente a ahorro real de agua

La fracción recuperable del retorno ($\phi = 0.50$) no es ahorro: reduce el ahorro efectivo a escala de c

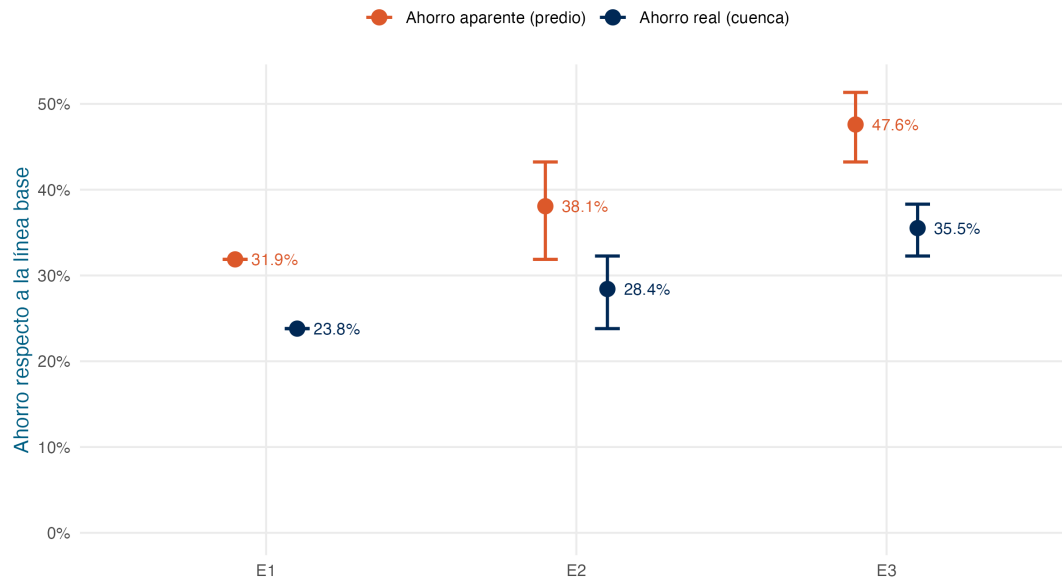


Figura 3: Ahorro aparente y ahorro real por escenario. Las barras de error corresponden al rango de eficiencia definido para los escenarios E2 y E3: el ahorro real de E3 se sitúa entre 32.3% y 38.3% según el extremo del rango.

Relación entre eficiencia global del riego y ahorro de agua

Las bandas sombreadas corresponden al rango de eficiencia de cada escenario

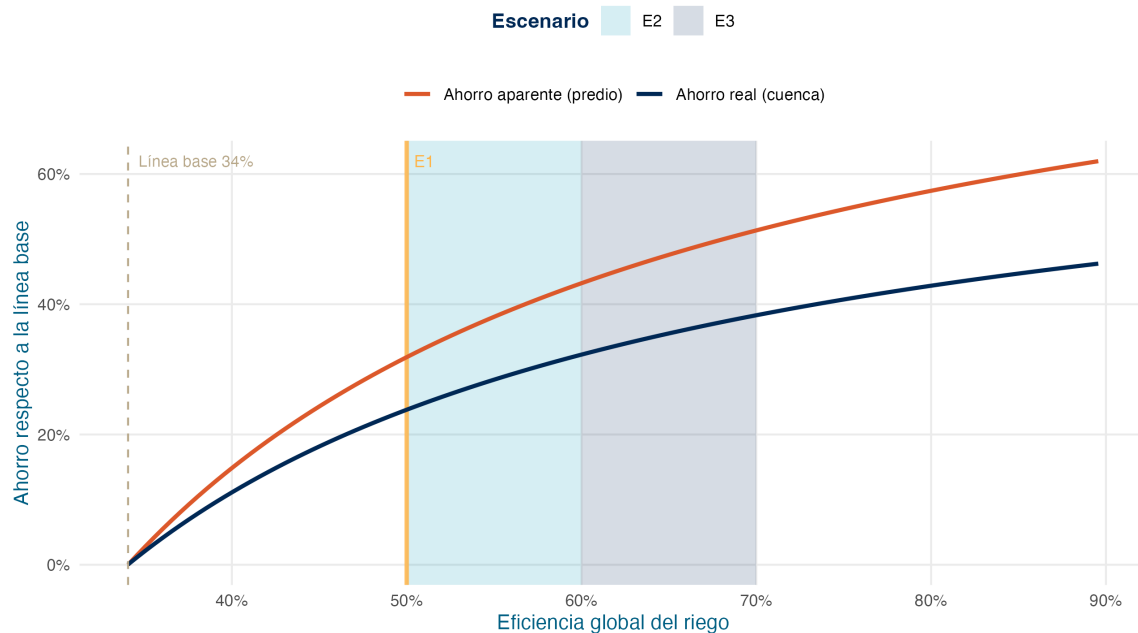


Figura 4: Relación continua entre la eficiencia global del riego y el ahorro de agua. La curva de ahorro real crece de forma marcadamente más lenta y muestra rendimientos decrecientes desde eficiencias moderadas.

3.3. Por qué el ahorro real es menor que el aparente

La brecha entre ambas cifras suele resultar contraintuitiva, por lo que conviene explicitar el mecanismo. La intuición corriente sostiene que un riego con 34 % de eficiencia “desperdicia” el 66 % restante, y que tecnificar permite recuperar ese desperdicio. Sin embargo, ese 66 % no se destruye: se infiltra, drena por los canales y una parte regresa a la red hídrica o al acuífero dulce, donde sigue disponible para otros usuarios. En las cuencas de estudio esa parte recuperable se estima en cerca de la mitad del retorno.

3.3.1. Ilustración con tres predios en serie

Considérese un río con 300 unidades de caudal en cabecera y tres predios sucesivos, cada uno con un requerimiento de 40 unidades de consumo del cultivo. Bajo una eficiencia del 40 %, cada predio capta 100 y devuelve 60; bajo una eficiencia del 80 %, capta 50 y devuelve 10.

Tabla 3: Caudal del río a lo largo de su recorrido, suponiendo que la totalidad del retorno regresa al cauce

Punto del río	Actual (40 %)	Tecnificado (80 %)
Cabecera	300	300
Tras la captación de A	200	250
Tras el retorno de A	260	260
Tras la captación de B	160	210
Tras el retorno de B	220	220
Tras la captación de C	120	170
Tras el retorno de C	180	180

La captación total cae de 300 a 150 unidades, una reducción del 50 %, y sin embargo el predio B recibe exactamente 260 unidades en ambos casos, el predio C recibe 220, y el río abandona la cuenca con 180. Ningún usuario aguas abajo recibe una sola unidad adicional. La razón es que lo que cada predio sustrae del río en términos netos nunca fue su captación, sino su consumo, y el consumo no cambió. Al captar menos, el predio también devuelve menos, y ambos efectos se cancelan en todo punto situado aguas abajo del retorno.

Lo único que cambia físicamente es el tramo comprendido entre la bocatoma y el punto de retorno de cada predio, que pasa a conducir 250 unidades en lugar de 200. Es un beneficio real, pero circunscrito a ese tramo.

3.3.2. De dónde procede entonces el ahorro real

Introdúzcase ahora la fracción del retorno que se pierde de forma definitiva. Con fines didácticos se emplea una fracción pequeña; en las cuencas de estudio la fracción no recuperable adoptada es $1 - \varphi = 0.50$. Si de las 60 unidades devueltas solo 54 alcanzan el cauce y 6 se pierden por percolación a acuíferos salobres, evaporación no benéfica o drenaje al sistema cenagoso terminal, el balance cambia:

Tabla 4: Balance del río considerando un 10 % de pérdidas no recuperables

	Actual	Tecnificado	Cambio
Captación total	300	150	-50 %
Consumo del cultivo	120	120	0
Pérdidas no recuperables	18	3	-15
Caudal a la salida de la cuenca	162	177	+15
Agotamiento del río	138	123	-10.9 %

Reducir la captación a la mitad produce un alivio del 10.9 %, no del 50 %. Y las 15 unidades ganadas coinciden exactamente con las pérdidas no recuperables que dejaron de producirse, tal como establece la identidad de la ecuación (5).

Por qué reducir la captación no equivale a liberar agua

Río con tres predios en serie: al captar menos, el predio también devuelve menos

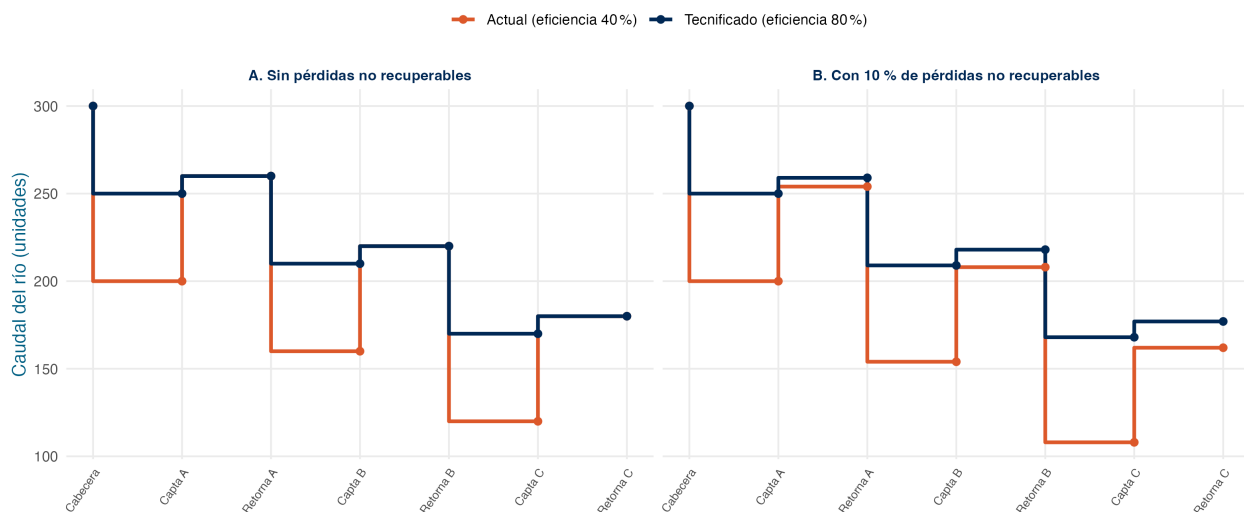


Figura 5: Perfil longitudinal del caudal en el ejemplo de tres predios en serie. En el panel A las dos trayectorias coinciden en cada punto de retorno; en el panel B la introducción de pérdidas no recuperables abre una brecha reducida, que constituye el ahorro real.

3.3.3. Descomposición del ahorro aparente en las cuencas de estudio

Aplicando esta lógica a los resultados de la simulación, los 229.2 hm³/año de ahorro aparente del escenario E3 se descomponen en dos partidas de naturaleza muy distinta:

Tabla 5: Descomposición del ahorro aparente del escenario E3 (hm³/año)

Componente	Volumen	Proporción
Retorno recuperable que dejó de circular <i>Agua que ya volvía a la red superficial o al acuífero dulce y seguía disponible aguas abajo</i>	114.5	50.0 %
Reducción de las pérdidas no recuperables <i>Agua que efectivamente abandonaba el sistema aprovechable: ahorro real</i>	114.7	50.0 %
Ahorro aparente total	229.2	100 %

3.3.4. Sustento y contraste de la fracción recuperable

Que una parte del retorno siga disponible aguas abajo es un rasgo general de los sistemas de riego por gravedad documentado por la literatura de contabilidad del agua (Van Opstal et al., 2021 y 2025; Grafton et al., 2018). En las cuencas de estudio es consistente, además, con la estructura de la demanda: como se documenta en la actividad 3.2.2, 7 de las 28 subcuencas presentan un Índice de Uso del Agua medio superior al 100 % aun con la demanda neta de palma, es decir, la demanda acumulada aguas arriba excede la oferta disponible media en el punto. Una condición semejante sólo puede sostenerse físicamente mediante el aprovechamiento sucesivo del mismo volumen de agua a lo largo de los drenajes, el racionamiento efectivo del riego en los meses secos o el uso de fuentes subterráneas.

El criterio determinante para el ahorro real es si el agua que deja de captarse se habría perdido de forma no recuperable, no si otro usuario la capta efectivamente. En la parte baja de las cuencas, donde los drenajes descargan al sistema cenagoso terminal, la fracción recuperable sería menor y la reducción de la captación se traduciría en mayor proporción en agua liberada. Esta observación es la base del gradiente por zona adoptado y de la secuenciación que se evalúa en la actividad 3.2.3. El resultado de Delphy et al. (2021), que implicaría $\varphi = 0.90$, se sitúa por encima de la banda adoptada y se interpreta como un escenario de reúso intensivo de los drenajes, no como la fracción recuperable de las tres cuencas.

3.4. Distribución espacial y estacional

Tabla 6: Captación bruta y neta por cuenca y escenario (m³/s)

Cuenca	Captación bruta				Captación neta			
	Base	E1	E2	E3	Base	E1	E2	E3
Aracataca	5.25	3.50	3.19	2.70	3.48	2.62	2.46	2.22
Frío-Sevilla	4.12	3.12	2.84	2.40	2.85	2.34	2.20	1.98
Fundación	5.89	3.77	3.43	2.90	3.90	2.83	2.66	2.40

La distribución de la demanda entre cuencas es relativamente homogénea en términos absolutos, con Fundación aportando la mayor captación (185.8 hm³/año y 16 686 ha de palma) y Frío-Sevilla la menor (130.2 hm³/año y 13 766 ha). Como la meta de eficiencia de cada escenario es uniforme pero la eficiencia de línea base difiere por cuenca, la reducción relativa de la captación, $1 - E_{\text{base},c}/E_e$, también difiere: en E3 es de 48.6 % en Aracataca, 41.8 % en Frío-Sevilla

y 50.8 % en Fundación, y es menor en Frío-Sevilla, la cuenca que parte de la eficiencia de línea base más alta.

Perfil mensual de captación bruta para riego de palma

Demanda concentrada en la temporada seca (diciembre a abril)

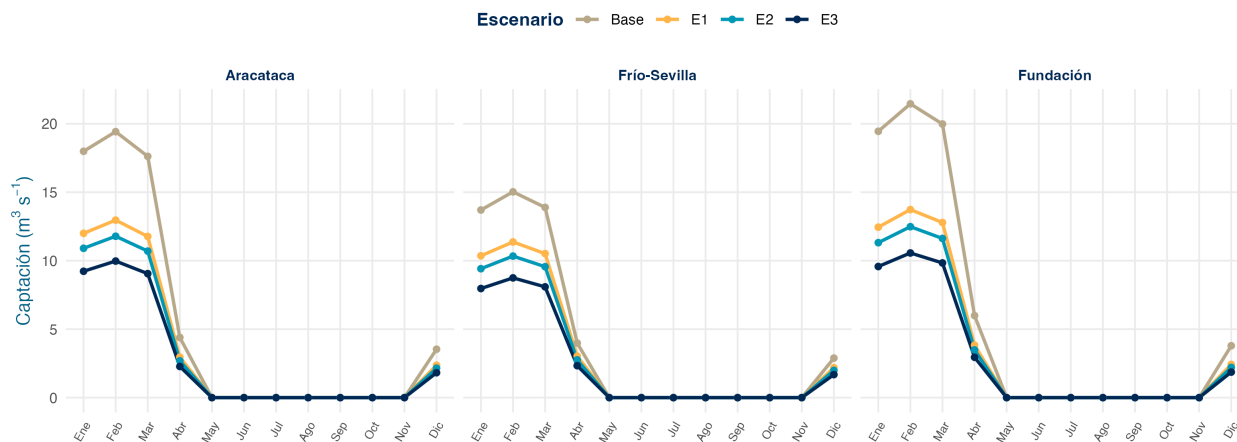


Figura 6: Perfil mensual de captación bruta. La demanda se concentra entre diciembre y abril, coincidiendo con el período de menor oferta hídrica, lo que amplifica la relevancia de los escenarios en la temporada crítica.

El perfil estacional resulta muy marcado: los meses de diciembre a abril concentran el 100 % de la captación anual, mientras que entre mayo y noviembre la demanda de riego es nula en el balance hídrico de la fuente. Esta concentración implica que el efecto de los escenarios se materializa precisamente en los meses de mayor escasez, aspecto que se analiza en detalle en la actividad 3.2.2.

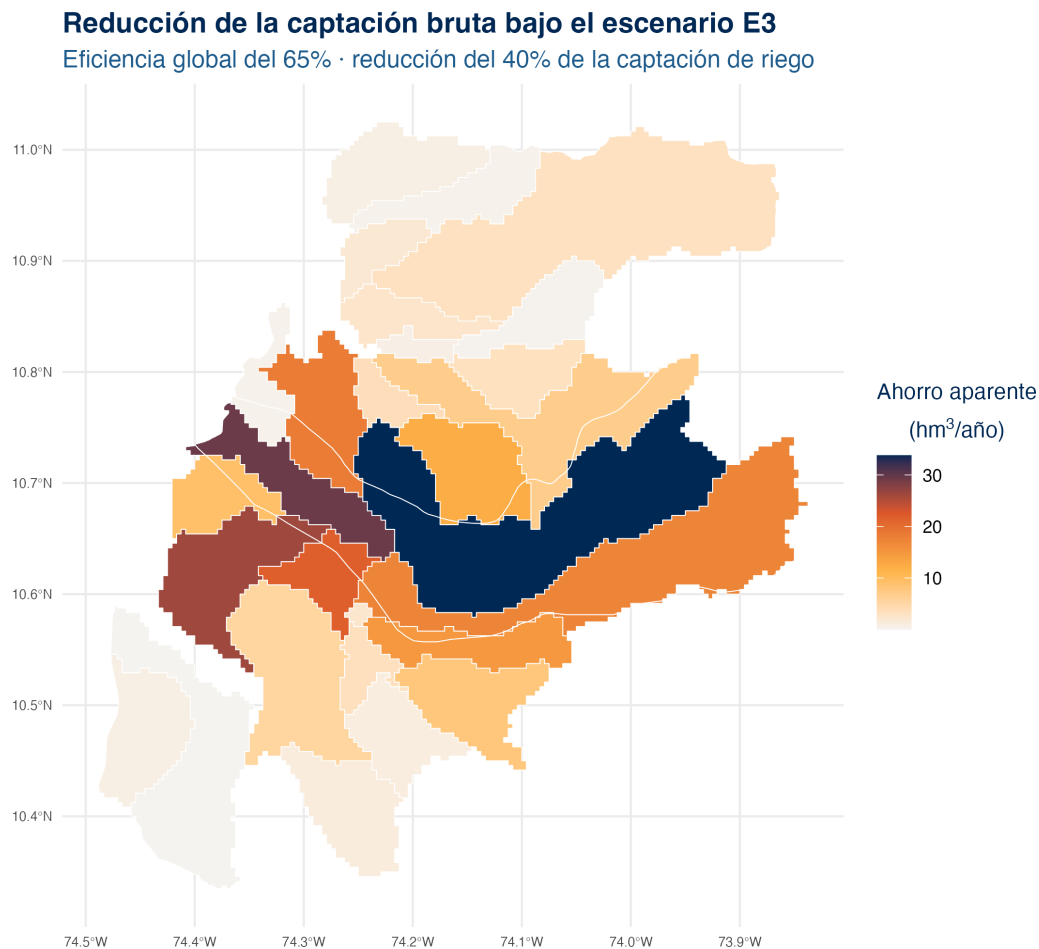


Figura 7: Distribución espacial del ahorro aparente bajo el escenario E3. Los mayores volúmenes se concentran en las subcuencas con mayor superficie sembrada.

4. Comprobaciones internas y relaciones por construcción

La simulación incorpora comprobaciones automáticas que se ejecutan con el análisis y detienen el proceso ante cualquier inconsistencia. Conviene distinguir dos tipos, porque tienen valor probatorio distinto:

1. Comprobaciones internas (pueden fallar si el código es incorrecto):

- *Invarianza del consumo del cultivo.* El consumo neto es idéntico en los cuatro escenarios (164.0 hm³/año), con una diferencia máxima inferior a 10^{-6} .
- *Balance de masa.* En cada registro, la captación bruta es la suma del consumo neto y el retorno, y la captación neta nunca supera la bruta.
- *Fracción recuperable.* La media ponderada de φ por COMID es igual al valor adoptado, 0.50, y cada valor por zona queda dentro de la banda de 0.40 a 0.65.
- *Compleitud.* La simulación produce los 1 344 registros esperados (4 escenarios $\times$ 28 COMID $\times$ 12 meses), sin valores faltantes.

2. Relaciones por construcción (se cumplen por definición y no validan el marco):

- *Reducción de la captación en E3.* Es igual a $1 - E_{\text{base}}/E_{\text{E3}} = 47.6\%$ por definición. Coincidiría con el 40 % de la Alternativa 0 de Findeter únicamente si se adoptara $E_{\text{base}} = 0.39$; ese contraste se reporta en la actividad 3.2.3 como sensibilidad, no como verificación.
- *Factor de realización.* La razón entre ahorro real y aparente es $1 - \varphi$ en cada COMID, de modo que el agregado, 0.50 en E3, refleja la fracción no recuperable adoptada.

Un contraste con grado de libertad real, que el marco no utiliza para ajustar ningún parámetro, es la comparación del caudal liberado por los escenarios con el déficit remanente que Findeter estima tras la optimización del riego; se presenta en la actividad 3.2.2.

5. Limitaciones

El parámetro φ constituye la principal fuente de incertidumbre del marco. Se adopta de revisiones y casos de la literatura internacional, no de mediciones en las cuencas de estudio, y no existen aforos de los drenajes de las plantaciones que permitan separar el retorno recuperable del no recuperable. En la banda adoptada, de 0.40 a 0.65, el ahorro real de E3 varía entre 29.2 % y 38.8 %; un valor como el que implica el estudio de Arosevilla lo reduciría considerablemente. La actividad 3.2.3 examina esta sensibilidad de forma explícita, junto con la sensibilidad a la eficiencia de línea base.

La demanda de riego se representa mediante un perfil climatológico construido a partir de tres años de cobertura (2018, 2020 y 2022), que se aplica de forma uniforme sobre el período hidrológico de 1985 a 2023. Este procedimiento captura la estacionalidad típica pero no la variabilidad interanual de la demanda, ni su posible respuesta a las condiciones climáticas de cada año, que en la práctica tendería a incrementar el riego en los años secos y a reducir la efectividad aparente de los escenarios en esas condiciones.

Finalmente, las metas de eficiencia se aplican de manera uniforme sobre toda el área de palma de cada cuenca. La composición real de sistemas de riego por subcuenca no está disponible en la base de datos del proyecto, por lo que no es posible diferenciar el margen de mejora entre predios ya tecnificados y predios bajo riego superficial.

6. Conclusiones

La traducción de los escenarios de la actividad 3.1.2 a parámetros de simulación produce un marco internamente consistente, anclado en la eficiencia de riego con la que se calculó la demanda de palma del proyecto y en una fracción recuperable del retorno adoptada de la literatura de contabilidad del agua de riego. La reducción de la captación bruta de riego de palma alcanza el 31.9 % en el escenario E1, el 38.1 % en E2 y el 47.6 % en E3, equivalente a pasar de 15.26 a 8.00 m³/s.

El resultado de mayor relevancia para la gestión es la brecha entre el ahorro aparente y el ahorro real. Bajo el escenario más ambicioso, la captación bruta se reduce en 47.6 % pero la presión efectiva sobre la cuenca sólo en 35.5 % (3.63 m³/s): cerca de 0.50 de cada unidad de agua ahorrada en el predio se traduce en agua liberada para la cuenca, porque el resto ya retornaba a la red y seguía disponible aguas abajo. En la banda de incertidumbre de φ el ahorro real de E3 se sitúa entre 29.2 % y 38.8 %. Este hallazgo, anticipado cualitativamente por el reporte 3.1.2, queda aquí cuantificado para las tres cuencas de estudio.

En consecuencia, la evaluación de los escenarios no puede apoyarse en la cifra de ahorro medida en el predio. Las actividades 3.2.2 y 3.2.3 desarrollan, respectivamente, el análisis de los impactos sobre el balance hídrico de las cuencas y la evaluación de la eficiencia de cada escenario, incluyendo el efecto del orden de implementación sobre el ahorro efectivamente alcanzable.

7. Productos generados

Tabla 7: Archivos generados por la actividad 3.2.1

Archivo	Contenido
00_comid_comun.R	Módulo común del proyecto: topología, demanda por COMID, eficiencia de línea base, caudal ecológico y escala IUA
00_escenarios_comun.R	Módulo compartido de la actividad 3.2: marco de escenarios, fracción recuperable φ por COMID y función de simulación
analisis_321.R	Simulación de los escenarios y comprobaciones internas
figuras_321.R	Generación de las siete figuras del reporte
simulacion_escenarios_comid_mes.parquet	Simulación completa por COMID, mes y escenario, con la demanda acumulada aguas arriba
escenarios_por_comid.parquet	Agregados anuales por subcuenca y escenario
escenarios_por_cuenca.parquet	Agregados anuales por cuenca y escenario
perfil_mensual_escenarios.parquet	Perfil mensual de captación
resumen_escenarios.csv	Tabla resumen con ahorros aparentes y reales

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.
- Delgado, T., Ladino, G., Zapata, A., & Arias, N. (2024). *Principios básicos para el manejo eficiente del riego en el cultivo de palma de aceite* (Boletín Técnico 47). 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.
- 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.
- Findeter, Asbama, Fedepalma. (2017-2018). *Diagnóstico hídrico para soluciones multipropósito en la región centro y norte del departamento del Magdalena*. Agua para la Paz.
- IDEAM. (2023). *Estudio Nacional del Agua 2022*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- 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>
- Van Opstal, J., Droogers, P., Kaune, A., Steduto, P., & Perry, C. (2021). *Guidance on realizing real water savings with crop water productivity interventions*. FAO y FutureWater, Wageningen. <https://doi.org/10.4060/cb3844en>

- 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). *Simulación de series temporales de caudales*. Reporte de actividad 2.2.2, Proyecto C-INV-AG-007. Cenipalma.