

Eficiencia en el uso del agua en una plantación de palma de aceite.

Importancia económica de su optimización

Water Use Efficiency in an Oil Palm Crop.

Economic Importance of Its Optimization.

AUTORES

Oscar Mauricio Álvarez

Ing agrícola, Inv. Auxiliar Cenipalma
malvarez@cenipalma.org

José Fernando Posada

Ing. Agrícola, Palmeras de Alamosa

Mauricio Mosquera Montoya

Economista.

M.Sc. Economía agrícola,
Cenipalma

Tomás García

Ing. Agrícola

Gerson Ardila

Ing. Agrícola

Palabras CLAVE

Balance hídrico, Déficit hídrico, Riego,
Canales, Eficiencia.

Water balance, Water deficit,
Irrigation, Channels, Efficiency.

Recibido: 9 agosto 2007
Aprobado: 9 agosto 2007

Resumen

En la zona palmera ubicada al norte de Colombia, se presentan condiciones de baja oferta de precipitación que hacen necesario la aplicación de riego durante por lo menos cinco meses al año. La mayor parte de los sistemas de riego existentes en esta zona, son sistemas de superficie que, por su ineficiencia, no permiten complementar la baja oferta ambiental. El proyecto contempló cuantificar la eficiencia del uso del agua en una plantación palmera representativa de la zona, obteniéndose un valor total de 5,8%, representado en una eficiencia de conducción de 35,6% y 16,1% de aplicación. Igualmente, se evaluaron, técnica y económicamente, alternativas de aplicación de riego por superficie y de revestimiento de canales, con el propósito de determinar condiciones de eficiencia potenciales.

Summary

The northern oil palm area of Colombia presents low rainfall conditions therefore it is necessary to use irrigation at least five months during the year. The most common irrigation system used in this area is the surface method, which given its inefficiency, it doesn't allow supplementing the low environmental supply. The project aimed at quantifying the water use efficiency in a representative oil palm crop of the northern area, getting a total value of 5,8%, representing a conduction efficiency of 35,6% and 16,1% of application. Moreover, other irrigation alternatives were assessed from the technical and economic standpoints, other surface irrigation application and canal lining, in order to determine potential efficiency conditions.

Introducción

Cerca del 90% del área sembrada con palma de aceite en la Zona Norte colombiana posee métodos de aplicación de riegos complementarios que pretenden suplir el déficit hídrico presentado en los meses de baja precipitación. Un alto porcentaje de las plantaciones fueron establecidas sin ningún tipo de planeación en cuanto a su requerimiento hídrico e infraestructura de riego y drenaje. En la mayoría de los casos, no se tuvo en cuenta la importancia que representa un adecuado diseño, que con base en un estudio edafo-climático y una caracterización topográfica, permita construir la infraestructura para garantizar la aplicación adecuada y eficiente del agua requerida.

Es por ello, que en estas plantaciones en la época de verano no se cuenta con el caudal suficiente para suplir los requerimientos hídricos y, además, la falta de infraestructura y métodos adecuados de riego, hacen que el caudal disponible no sea utilizado de manera eficiente. Plantaciones como Palmeras de Alamosa han emprendido acciones en la búsqueda de alternativas que permitan garantizar el suministro de agua en las épocas críticas.

El potencial para suplir el déficit hídrico de la plantación, con la construcción de un reservorio con capacidad de almacenamiento de 3 millones de m³, sugirió la necesidad de adelantar trabajos tendientes a diagnosticar las condiciones de eficiencia en el uso del agua para, con base en esas características, plantear acciones de optimización.

Mediante un análisis del efecto del déficit hídrico durante los meses de verano sobre la producción de la plantación, se encontró que un milímetro de agua que ingrese al suelo en este período es capaz de hacer producir 25,6 kg de racimos de fruta fresca por hectárea, 18 a 21 meses después. Esto permitió determinar que 1 m³ de agua almacenada en el período de verano, puede costar hasta \$355 por su efecto potencial sobre la producción. En términos generales, por cada punto porcentual que la plantación logre subir en la eficiencia total del sistema, mediante la implementación de las alternativas evaluadas, tendrá un beneficio económico de \$15.100/ha/año.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en los trabajos adelantados en la plantación, bajo la

dirección y acompañamiento de Cenipalma. Con este trabajo se pretende mostrar la importancia de los resultados obtenidos y lo indispensable para la viabilidad económica de la plantación, lo cual representa seguir adelantando acciones para la optimización del uso del agua como recurso fundamental.

Metodología

El estudio se desarrolló en la plantación Palmeras de Alamosa, ubicada en el municipio de El Paso (Cesar). Esta plantación posee un área de 965 hectáreas, regadas con aguas del río Calenturitas y con un reservorio que almacena 3.000.000 de m³ de agua en 120 hectáreas.

Levantamiento de campo y evaluación de la información existente

Esta actividad contempló la evaluación de la infraestructura de riego y drenaje de la plantación y la identificación de las diferentes obras de riego en los planos existentes con la observación simultánea en campo, lo que permitió entender la dinámica del manejo del agua de la plantación.

Así mismo, se realizó un inventario de todas las obras existentes dentro de los predios de la finca, incluyendo la totalidad de los canales internos de riego de los lotes. Además de una nivelación topográfica para el canal de conducción, los canales secundarios y alguno terciario. Los resultados de este proceso determinaron las pendientes de los diferentes canales y la ubicación de éstos, con respecto a las cotas del terreno en los lotes.

Caracterización física e hidrodinámica de suelos con fines de riego

Se realizó una caracterización de las propiedades físicas e hidrodinámicas del suelo que tienen relación con la disponibilidad de agua para la palma de aceite. Las propiedades evaluadas fueron; textura, según una malla de 200 m; densidad aparente, por el método de los cilindros con separaciones de 3 m del estípote y a 7,5, 22,5 y 37,5 cm de profundidad. Igualmente se tomaron muestras de suelo no disturbadas de las texturas representativas de la plantación. Éstas fueron enviadas al laboratorio del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) con el fin de realizar la curva de retención de humedad para 0,1, 0,3, 0,5, 1,5 y 15 atmósferas de presión. La determinación de la tasa de infiltración de



los suelos se realizó con el método de los anillos concéntricos a 1,5, 3 y 4,5 m de distancia del estípite.

Evaluación de las condiciones de eficiencia en la plantación

Una de las principales actividades planteadas en el proyecto consistió en la determinación de las condiciones que se tienen en la actualidad en el uso del agua. De esta manera se desarrollaron metodologías que permitieron cuantificar las pérdidas de agua, tanto en la conducción como en la aplicación.

Eficiencia de aplicación

Se caracterizaron eventos de riego en zonas representativas de la plantación. La metodología utilizada consistió en seleccionar lotes que, según el criterio de la plantación, debían ser regados. Allí se tomaron muestras de suelo a diferentes profundidades, en diferentes sitios y con determinación del contenido de humedad. Luego se aforó el canal principal de riego del lote y se esperó que el regador realizara su labor normal. Posteriormente, se determinó el área regada con dicho caudal y el tiempo empleado para tal fin. Para calcular la cantidad de agua que fue retenida por el suelo en la profundidad radicular se tomaron muestras en los mismos puntos previos al riego.

Evaluación de la eficiencia de conducción

Esta actividad consistió en una medición detallada de los valores de eficiencia de conducción de agua en los diferentes canales de la plantación. Se emplearon molinetes de aforos análogos y digitales (Figuras 1 y 2).

Los aforos realizados en el canal de conducción principal se hicieron cada 200 m de longitud, desde la salida del reservorio hasta la plantación. Esto permitió obtener un índice de pérdidas de agua por cada 100 metros de canal. Los aforos se hicieron con la utilización del método de puntos reducidos y el empleo de un correntómetro digital.

Resultados y discusión

De lo encontrado en la caracterización de los suelos con fines de riego, se destaca la baja variabilidad de las propiedades evaluadas, porque en su mayoría se encontraron texturas pesadas.



Figura 1. Molinete Kempten Z21.



Figura 2. Medición de la velocidad de flujo en un canal de conducción.

Lo anterior permitió generar valores promedio para las condiciones de la plantación (Figuras 3 y 4).

Obteniendo la ecuación de la curva y resolviéndola para diferentes valores de tensión y humedad, se genera la siguiente información (Tabla 1).

Con los valores promedios de densidad aparente y retención de humedad, se calcula el agua aprovechable (AA) y el agua fácilmente aprovechable (AFA) para una profundidad radicular de 60 cm:

Agua aprovechable (AA): $23,16\% - 16\% = 7,16\%$

Agua fácilmente aprovechable (AFA):

$23,16\% - 19,89\% = 3,27\%$

Los datos muestran que si el punto crítico de riego para la palma de aceite corresponde a 1,5 atmósferas, la capacidad de almacenamiento de los suelos para

Tabla 1. Valores promedios de retención de humedad

Tensión (Atm)	Humedad %
0,1	25,70
0,3	23,16
0,5	22,07
1	20,67
1,5	19,89
2	19,36
3	18,63
4	18,13
5	17,76
6	17,45
8	16,98
10	16,63
12	16,35
14	16,11
16	16,00

bargo, en las condiciones actuales de infraestructura y disponibilidad de agua de la plantación, es bastante difícil mantener esta frecuencia.

Las propiedades de almacenamiento de agua de los suelos de la plantación le generan condiciones desfavorables, máxime porque se cuenta con un método de riego superficial que hace prácticamente imposible garantizar las frecuencias de riego requeridas. Igualmente indica que en varias épocas del año las palmas presentan algún grado de estrés hídrico.

Caracterización mineralógica de arcillas

A pesar de ser suelos arcillosos se obtuvieron valores tan bajos en las curvas de retención de humedad que se decidió hacer una caracterización mineralógica de las arcillas que componen los suelos de la plantación. Ésta mostró el predominio de arcillas del tipo micas,

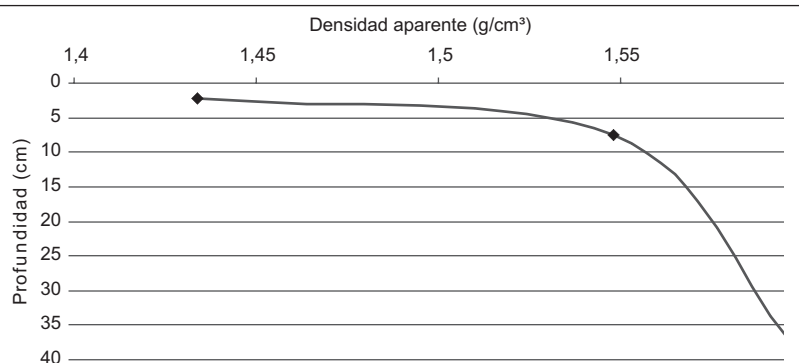
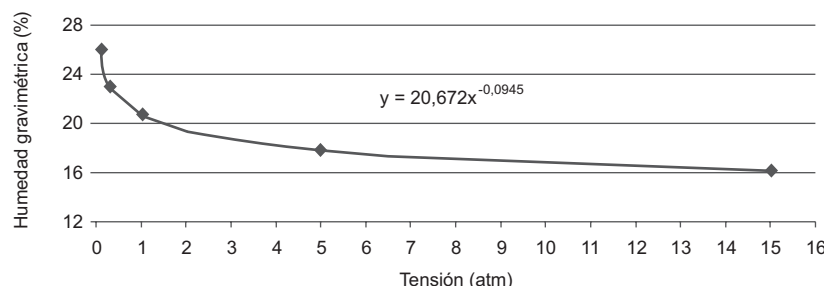
y una presencia significativa de caolinitas, las cuales se caracterizan por su baja superficie específica y por consiguiente, baja retención de humedad.

Tasa de infiltración

Por la similitud de los resultados obtenidos, se elaboró una curva de infiltración promedio para los 34 puntos determinados (Figura 5).

De la ecuación de infiltración acumulada es posible determinar el tiempo durante el cual el agua debe estar en contacto con el suelo para alcanzar una humedad a capacidad de campo en el momento del riego. Este valor sería de 31 mm correspondiente a la lámina neta determinada. Realizando el cálculo se obtiene que ese tiempo corresponde a un valor de 40 minutos, lo que indica que para que la aplicación de

riego sea lo más eficiente posible, el caudal debe ser lo suficientemente alto de tal manera que el tiempo de riego sea mínimo.

**Figura 3.** Distribución promedio de la densidad aparente.**Figura 4.** Curvas de retención promedio.

una profundidad de 60 cm es de 31 mm. Esto indica que para una época en la cual se presente una evapotranspiración promedio de 6 mm/día, la frecuencia de riego debe ser de aproximadamente 6 días. Sin em-

**Tabla 2.** Valores de almacenamiento de agua para el perfil de 60 cm

Profundidad (cm)	Densidad aparente g/cm ³	Espesor (cm)	Agua aprovechable AA(%)	Lamina neta (mm)	Agua fácilmente aprovechable AFA (%)	Lámina neta
0 a 5	1,434	5	7,16	5,13	3,27	2,34
5 a 15	1,548	10	7,16	11,08	3,27	5,06
15 a 60	1,597	45	7,16	51,46	3,27	23,50
Total almacenado (mm)				67,67		30,91

Adicionalmente se observan indicios de las condiciones de eficiencia de aplicación de riego de la plantación, donde son normales valores de tiempo de riego de más de 24 horas.

Eficiencia de aplicación

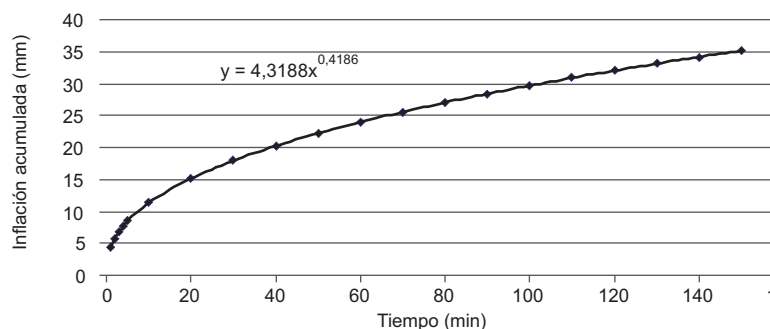
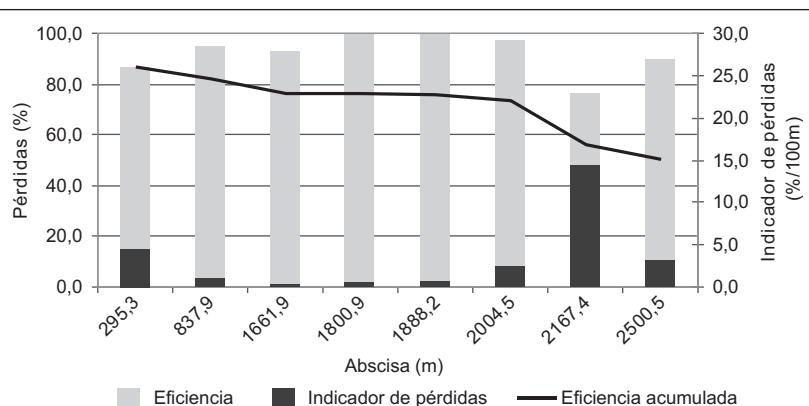
Los resultados obtenidos al evaluar un evento de riego son:

- Área regada: 17,9 ha
- Caudal empleado: 193,1 l/s
- Tiempo de riego: 60,28 horas
- Volumen utilizado: 41904 m³
- Lámina de riego aplicada: 233,87 mm
- Contenido de humedad antes del riego: 17,989%
- Contenido de humedad después del riego (48 h): 23,314%
- Densidad aparente: 1,55 g/cm³
- Profundidad efectiva: 60 cm
- Lámina de agua aprovechada por el suelo: 37,6 mm
- Eficiencia de aplicación: 16,1%

Como se observa, las condiciones actuales de aplicación de la plantación evidencian grandes pérdidas de agua. Este hecho es el resultado de la baja adecuación de los lotes para tal fin y por una muy baja capacidad de almacenamiento de agua de los suelos.

Eficiencia de conducción

En la Figura 6 se presentan los resultados obtenidos en el aforo de los 2.500 m del canal de conducción desde el reservorio hasta la plantación.

**Figura 5.** Curvas de retención promedio.**Figura 6.** Eficiencia de conducción canal de conducción reservorio plantación.

La eficiencia total del canal es de un 50,2%, mostrando tramos con indicadores de pérdidas inferiores a 1%/100 m de canal, pero presentando valores de hasta 14%/100m. Esto muestra la necesidad de hacer evaluaciones y correcciones puntuales como, por ejemplo, en el tramo comprendido entre las abscisas 2.004,5 y 2.500,5, donde el canal presenta las mayores pérdidas.

De la misma manera, se determinó la eficiencia para rutas representativas de la red de conducción de la plantación. Los resultados se presentan en la Tabla 3, donde se incluye la eficiencia en el canal principal y se determina la eficiencia total.

Tabla 3. Valores de eficiencia en la conducción del agua

Tramo	Eficiencia de conducción %
Reservorio – plantación	50,5
Canal principal	90
Canales secundarios (Promedio)	88,5
Canales internos (promedio)	89
Eficiencia total	35,6

Se puede observar que una eficiencia total de conducción de 35,6% evidencia grandes problemas en el aprovechamiento del agua almacenada en el reservorio. Es en función de esta eficiencia que surge la necesidad de buscar alternativas que mejoren las condiciones de conducción de agua, de tal forma que permitan una mayor disponibilidad del recurso para el riego.

Eficiencia total del sistema

La eficiencia total del sistema de riego indica el porcentaje de agua, derivada del reservorio, que llega efectivamente a la zona de raíces de la palma. El cálculo de este valor consiste en obtener el porcentaje del agua que logró llegar a la cabecera del lote y que fue retenida en el suelo tras la aplicación del riego.

Eficiencia total (Et) = Eficiencia en conducción (Ec)

** Eficiencia en aplicación (Ea)*

$$Et = 35,6\% * 16,1\%$$

$$Et = 5,7\%$$

Este valor muestra claramente la baja eficiencia en el uso del agua e indica que de cada 100 litros almacenados, sólo 5,7 litros ingresan para la disponibilidad del cultivo en la zona de raíces.

Cálculo de necesidades netas

Un valor teórico de evapotranspiración (ET) de 150 mm/mes, determina el caudal máximo requerido por el cultivo en épocas de riego. De esta manera, el cálculo de las necesidades es el siguiente:

$$Nn = \frac{150\text{mm}}{\text{mes}} * \frac{10\text{m}^3/\text{ha}}{1\text{mm}} * \frac{1\text{mes}}{30\text{días}} * \frac{1\text{día}}{24\text{h}} * \frac{1\text{h}}{360\text{s}} * \frac{1000\text{l}}{1\text{m}^3}$$

$$\Rightarrow Nm = 0,58 \text{ l/s/ha}$$

Para satisfacer los requerimientos hídricos de las aproximadas 955 ha en el mes más crítico, se debe contar con suministro neto permanente de 554 l/s. Este valor, al ser neto, no contempla la eficiencia del sistema e indica un suministro las 24 horas del día.

Requerimientos hídricos brutos de la plantación (Nt)

El valor obtenido de requerimiento neto (Nn), consiste en un valor teórico demandado por el cultivo. Para la determinación de las necesidades totales de caudal es necesario afectar este valor con el valor de eficiencia que está en función del método de riego que se utilizaría eventualmente:

$$Nt = Nn / Ef$$

De esta manera se tiene:

$$Nn = 0,58 \text{ l/s/ha}$$

Área regada: 955 hectáreas

$$Nt = 554 \text{ l/s} / 0,057$$

$$Nt = 9720 \text{ l/s} (9,72 \text{ m}^3/\text{s})$$

Disponibilidad del recurso

Realizando un análisis de la disponibilidad de agua para la época crítica de verano, en donde se asume que la única fuente de agua es el reservorio y que su duración sea de enero a marzo, se obtiene el caudal disponible:

$$\text{Volumen disponible} = 3'000.000 \text{ m}^3$$

$$\text{Días de verano} = 90$$

$$Q = \frac{3'000.000 \text{ m}^3}{90 \text{ días}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} * \frac{1000 \text{ l}}{1 \text{ m}^3}$$

$$\Rightarrow Q_{\text{disp}} = 386 \text{ l/s}$$

Un valor de necesidades netas de 9.720 l/s durante las épocas críticas es bastante alto, respecto a los 386 l/s con que cuenta la plantación para dicho período. Sin embargo, es necesario cuantificar qué cantidad del agua que se asume como “pérdida” en la aplicación, vuelve a ser utilizada para regar “aguas abajo” o va a alimentar el nivel freático. Aunque un valor muy general de dicha agua, que en realidad recircula, ha sido determinada en otras plantaciones palmeras, en las que alcanza a ser de un 14%. Valor que tiene muy poca significancia



en las pérdidas totales, puesto que ese porcentaje que entra a recircular al sistema está igualmente afectado por la eficiencia total del mismo con 5,7%.

Con la eficiencia actual del proceso, un valor de necesidades netas de 9,72 m³/s indica que si en un período seco no está ingresando al sistema ese caudal de manera permanente, el ciclo de riego no es suficiente para satisfacer unos requerimientos máximos de 5 mm/día. De hecho, la plantación ha experimentado años en los cuales el agua no ha alcanzado sino para realizar menos de dos riegos por palma.

Alternativas para mejorar la eficiencia y perspectivas de la plantación

De manera casi simultánea, y en gran medida como resultado del proceso de diagnóstico de las condiciones de eficiencia, se han adelantado trabajos tendientes a determinar alternativas que permitan conocer el potencial de mejora en la eficiencia del uso del agua de la plantación. Para ello, se han evaluado diferentes métodos de aplicación de riego por superficie que puedan ser adaptables a las condiciones existentes. Estos trabajos han contemplado el registro de variables técnico-económicas, de tal manera que se permita un análisis relacionado con la viabilidad de la implementación de manera generalizada de las alternativas evaluadas. También, se han realizado análisis técnicos y económicos para diferentes alternativas de revestimiento de canales de riego.

Con relación al potencial técnico de los métodos de riego, el que se realiza por melgas rectangulares ha mostrado que es posible tener eficiencias de aplicación de hasta 50%, es decir, cerca de tres veces la actual. Las alternativas de revestimiento de canales evaluadas de manera teórica, con base en los indicadores de pérdidas determinadas en el canal de conducción desde el reservorio hasta la plantación, han contemplado inicialmente como alternativas, el revestimiento con suelo-cemento, concreto, polietileno y geomembrana,

de su totalidad 2.500 m y los 500 m más críticos. En dicho análisis se contempló su vida útil y los costos de inversión inicial.

A continuación se resumen los costos de inversión inicial y por año para una hectárea de la plantación, en el caso de adecuar los lotes para melgas rectangulares y revestir con concreto un tramo o la totalidad del canal. El análisis de diferentes alternativas mostró cierta similitud en los costos por año, entre el concreto y la geomembrana (Tabla 4).

La inversión en infraestructura para mejorar las condiciones de manejo del agua en la plantación es relativamente considerable. Este hecho amerita realizar un análisis del impacto económico que mejoraría la eficiencia del sistema. Para ello, se considera que es necesario conocer qué efecto ha tenido el agua sobre la producción en las condiciones de la plantación.

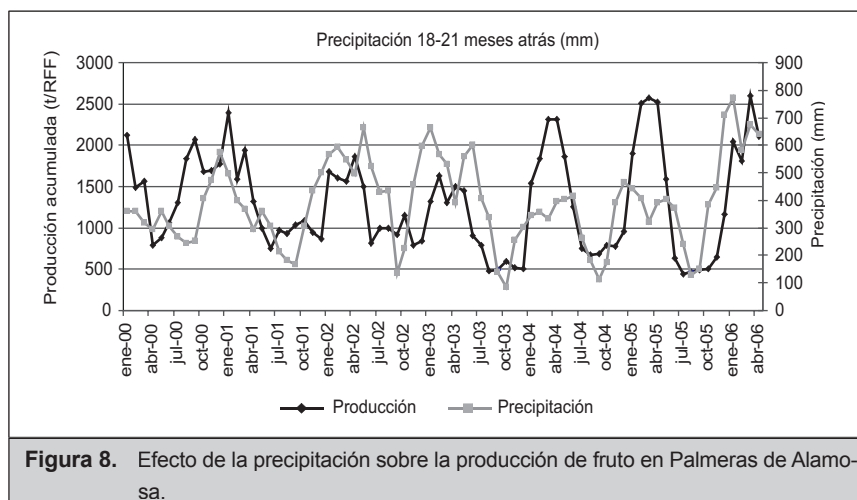
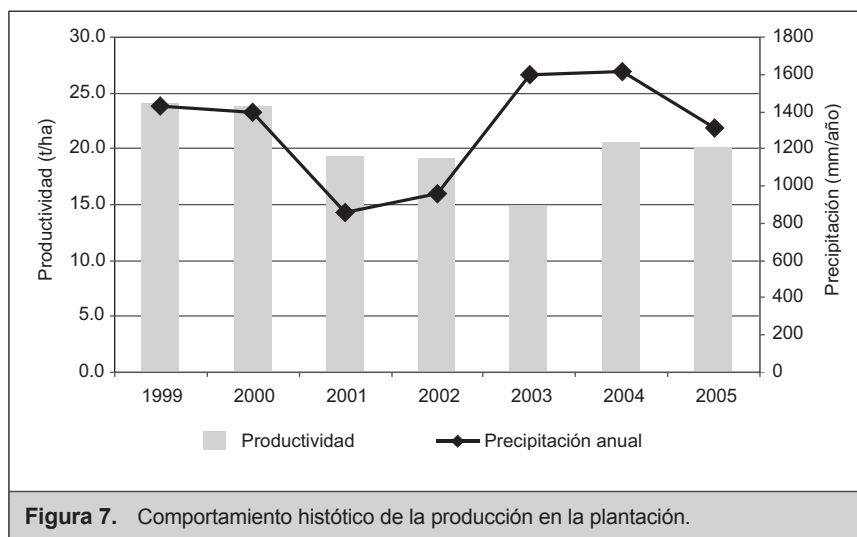
Efecto del agua sobre la producción y la importancia de mejorar su eficiencia en la plantación

El efecto del déficit de agua sobre la palma de aceite tiene impacto desde los 10 meses (Manjarrés y Mosquera, 2004) y hasta dos años después de ocurrido el evento (Lubis *et al.*, 1993, Corley y Hong 1981, citados por Mejía 2000). De hecho, en las regiones palmeras en donde se presenta un período seco más acentuado, y no se presenta una adecuada reposición de agua mediante riego, la producción de fruto presenta picos para los diferentes meses del año. El período seco, que repetitivamente se presenta todos los años, si no es atenuado con adecuado riego, tiene un efecto directo sobre la caída en la producción de fruto unos meses después.

Según se observa en la Figura 7, para la producción de fruto analizada desde el año 1999, existen períodos en los cuales la productividad ha tenido caídas substanciales, llegándose a presentar años como el 2003 en donde ésta apenas alcanzó las 15 t/ha. Esto muestra

Tabla 4. Resumen de los costos por concepto de adecuación de lotes y revestimiento de canales

Adecuación		Inversión inicial (\$/ha)	(\$/ha/año) según vida útil
Adecuación de lotes para melgas rectangulares		192.786	57.227
Revestimiento de canal reservorio – plantación	Longitud 500 m	49858	1.662
	Longitud 2.500 m	249.291	8.310



claramente que existe un fenómeno climático que afecta de manera significativa la producción de fruto en la plantación, puesto que el manejo agronómico ha sido similar para el período analizado.

A pesar del mencionado efecto del agua sobre la producción, esta relación no es clara cuando se analiza a una escala anual. Aunque es posible que un año que presente una baja productividad coincida con que en el primer o segundo año inmediatamente anterior la precipitación fue igualmente baja, existen factores relacionados con la distribución de esa precipitación que puedan enmascarar unos efectos más directos entre las dos variables.

De esta manera, reduciendo en la escala de análisis el nivel de mes, la Figura 8 muestra como, para el caso de la plantación, se presenta una muy buena correlación entre la producción actual y la suma de

la precipitación ocurrida los 18, 19, 20 y 21 meses anteriores.

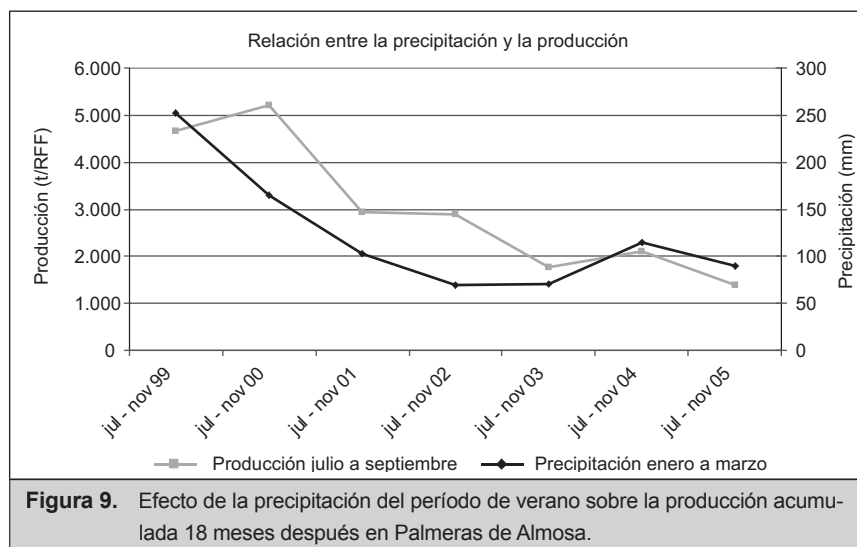
En la Figura se observa cómo, normalmente en la plantación, se presentan picos de producción durante los meses de enero a abril y unas caídas significativas de julio a septiembre, las cuales pueden ser consecuencia del verano ocurrido de enero a marzo del año inmediatamente anterior (18 – 20 meses atrás). De igual manera, la Figura 9 muestra que existe una buena correlación entre la precipitación total de enero a marzo y la producción acumulada de los meses de julio a septiembre del año siguiente.

Es evidente una marcada disminución de la precipitación a través del tiempo y efectivamente la correlación entre estas dos variables, las cuales en realidad deberían ser corregidas con la precipitación efectiva, pues como se sabe, es muy importante conocer

su distribución e intensidad para saber en realidad la cantidad que ingresó al suelo.

De igual forma, es importante conocer durante este período la cantidad de agua que fue aplicada para hacer una correlación más precisa. Al respecto se comenta que en términos teóricos, la lámina aplicada por riego para este período (enero – marzo) para cada año debe ser la necesaria para completar un requerimiento de aproximadamente 450 mm (150 mm/mes).

Por ejemplo, para el verano de 1998 donde la precipitación acumulada fue de 250 mm, asumiendo que todos fueron efectivos, la lámina de riego para evitar déficit hídrico debió haber sido por lo menos de 200 mm; de igual forma, para el verano de 2004, donde la precipitación fue de 90 mm, la lámina aplicada debió ser de aproximadamente 360 mm. Realizando un análisis de los registros de riego de la plantación,



se tienen los siguientes datos para estos períodos (Tabla 5)

Se observa que en ninguno de los períodos de verano analizados existió la posibilidad de satisfacer mediante riego los requerimientos hídricos del cultivo, presentándose que para el caso más favorable se realizaran apenas dos aplicaciones durante todo el período, es decir, una lámina neta de cerca de 60 mm.

Un punto muy importante que se puede observar del presente análisis es que en el período de enero a marzo de 2004, donde se comienza a poner en funcionamiento el reservorio construido, los riegos promedios aplicados por lote apenas alcanzan a ser de 1,8, valor muy similar a los aplicados en años anteriores. Este hecho ratifica el valor de eficiencia total de la plantación de 5,76% e indica que efectivamente el agua que se está almacenando, no está llegando a donde debe llegar. Este análisis es igualmente ratificado

con el efecto en la producción (Figura 9), el cual es corregido con la lámina de riego aplicada (Tabla 6).

De nuevo se observa la marcada tendencia de disminuir la producción a medida que disminuye la lámina acumulada de riego, más la precipitación para el período de verano. Lógicamente esta relación no es uno a uno porque la precipitación registrada no es cien por ciento efectiva y además, porque intervienen otros factores climáticos como la radiación, la temper-

atura y la humedad relativa.

Sin embargo, realizando una correlación entre estas dos variables, se observa como una línea recta explica en un 72% ($R^2 = 0,7186$) su comportamiento (Figura 10).

La ecuación que describe el comportamiento de la producción acumulada de julio a septiembre en función de la lámina de riego más la precipitación durante el período de enero a septiembre del año anterior es la siguiente:

$$T = 22,45P - 595,38$$

Donde:

T : Es la producción en toneladas de fruta

P : Es la precipitación en mm.

Reemplazando en la ecuación los valores extremos de precipitación más riego, registrados para el período

Tabla 5. Lámina de agua por efecto del riego y la precipitación para los períodos de verano en Palmeras de Alamosa.

Período	Precipitación (mm)	Número de riegos promedio	Lámina aplicada (mm)*	Lámina total P + R (mm)	Déficit (mm)
Ene – Mar 98	252,33	1	30	282	168
Ene – Mar 99	165	1,6	48	213	237
Ene – Mar 00	103	2	60	163	287
Ene – Mar 01	69	1,6	48	117	333
Ene – Mar 02	70,7	1	30	101	349
Ene – Mar 03	115,33	0,5	15	130	320
Ene – Mar 04	89,333	1,8	54	143	307

* El cálculo de lámina aplicada se hace con el valor de lámina neta (LN) de 31 mm determinado anteriormente según las curvas de retención de humedad de los suelos de la plantación. Este indica el valor que es capaz de almacenar el suelo al momento de un riego.

Tabla 6. Efecto de la precipitación y el riego del periodo de verano sobre la producción acumulada 18 meses después en Palmeras de Alamosa.

Período	Precipitación	Lámina total	Producción	Período de
Ene – Mar 98	252,33	282,33	4.662,04	Jul – Sep 99
Ene – Mar 99	165	213	5.201,25	Jul – Sep 00
Ene – Mar 00	103	163	2.937,42	Jul – Sep 01
Ene – Mar 01	69	117	2.895,57	Jul – Sep 02
Ene – Mar 02	70,7	100,7	1.761,03	Jul – Sep 03
Ene – Mar 03	115,33	130,33	2.112,15	Jul – Sep 04
Ene – Mar 04	89,333	143,333	1.393,97	Jul – Sep 05

analizado, se tiene:

$$T_{(100,7)} = 22,445 (100,7) - 595,38$$

$$T_{(100,7)} = 1664,8 \text{ Ton}$$

$$T_{(282,33)} = 22,445 (282,33) - 595,38$$

$$T_{(100,7)} = 5.741,51 \text{ Ton}$$

De lo anterior se obtiene que 181,63 mm son responsables de generar un incremento en producción de 4.076,71 toneladas. Asumiendo que el incremento en producción sea apenas de 3.500 toneladas y dividiendo por 765 hectáreas, se tiene que el aumento es de aproximadamente 4,6 t/ha. De esta manera, un milímetro de agua que ingrese al suelo en el período de verano de enero a marzo, es capaz de generar un incremento de 25,6 kg/ha en el período de julio a septiembre. Además, sabiendo que un milímetro equivale a diez metros cúbicos de agua por hectárea y que el precio de la tonelada de fruto fuera de \$140.000, se tiene que el precio de un metro cúbico de agua, por la potencialidad que representa para esas condiciones,

sería de \$355.

Es así que se puede calcular el precio volumétrico del agua por concepto de construcción del reservorio, asumiendo una vida útil de 20 años y una depreciación en línea recta para este período:

En 20 años almacenaría $20 \times 3'000.000 \text{ m}^3 = 60'000.000 \text{ m}^3$ El costo por m^3 almacenado sería:

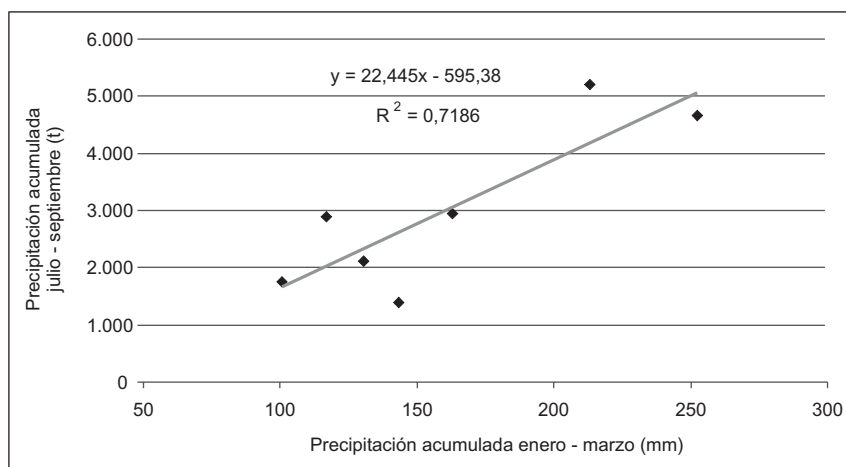
$$\text{Cm}^3: \$1'836.000.000/60'000.000 \text{ m}^3$$

$$\text{Cm}^3 = 30.6 \text{ \$/m}^3$$

De esta manera, se tiene que 1 m^3 de agua que sea almacenado en el reservorio tiene un costo total de \$385,6.

Análisis de Costo - Beneficio

Si se conocen los costos en los que se incurriría para mejorar las condiciones de eficiencia en la plantación y el valor volumétrico del agua por concepto de potencialidad en incremento en la producción, es posible determinar qué tan rentable sería para la plantación invertir en los trabajos planteados en el proyecto.

**Figura 10.** Correlación entre precipitación del período de verano y la producción acumulada 18 meses después en Palmeras de Alamosa.

Para el análisis se evalúan las siguientes alternativas:

- Revestimiento de los 500 m del canal del reservorio a la plantación donde se presentan las mayores pérdidas.
- Revestimiento de los 2.500 m del canal del reservorio a la plantación.
- Revestimiento de los 500 m del canal del reservorio a la plantación donde se presentan las mayores pér-

**Tabla 7.** Resumen de aspectos técnico – económicos para la evaluación de alternativas

Agua Disponible	Adecuación realizada	Eficiencia de producción				Eficiencia de aplicación %	Agua aprovechada (m³)	Lámina aplicada (mm)	Producción t/ha/año	Beneficio		Inversión		Beneficio neto	
		Reservorio-Plantación %	Canal principal %	Canal Secundarios %	Canales Intermedios %					Producción t/ha/año	(\$/año)	Total-765 ha (\$/año)	Inicial (\$/ha/año)	Total 765 Ha \$	(\$/Ha/año) Según vida útil
3.000.000	Ninguna	50,50	90	88,50	89	16,10	172.908	18,106	0,459	87,057	66.598.330	0	0	0	0
		35,80													
3.000.000	Revestimiento 500m del canal	73,00	90	88,50	89	16,10	249.946	26,172	0,663	125.844	96.270.854	38.141.500	49.858	124.182	94.999.354
		51,75													
3.000.000	Revestimiento 2.500m del canal	95,00	90	88,50	89	16,10	325.272	34,060	0,863	163.770	125.283.988	190.707.500	249.291	155.459	118.926.488
		67,34													
3.000.000	Revestimiento 500m del canal + adecuación lotes	73,00	90	88,50	89	40,00	620.983	65,024	1,647	312.657	239.182.245	185.622.790	242.644	253.767	194.132.090
		51,75													
3.000.000	Revestimiento 2.500m del canal + adecuación lotes	95,00	90	88,50	89	40,00	808.129	84,621	2,143	406.882	311.264.565	338.188.790	442.077	341.344	261.128.410
		67,34													
3.000.000	Adecuación lotes	50,50	90	88,50	89	40,00	429.584	429,584	1,139	216.290	165.461.690	147.481.290	192.786	159.063	121.683.035
		35,80													

didas y adecuación de 765 ha para ser regadas por melgas rectangulares.

- Revestimiento de los 2.500 m del canal del reservorio a la plantación y adecuación de 765 ha para ser regadas por melgas rectangulares.
- Adecuación de 765 ha para ser regadas por melgas rectangulares.

Para el análisis realizado se hace uso de los costos calculados para cada adecuación (Tabla 3).

Cada alternativa planteada tendría un efecto sobre la eficiencia total del sistema, lo cual se ve reflejado en un incremento en la lámina aplicada durante el período de verano y por lo tanto, en la producción del año siguiente. En todos los casos se observan beneficios cercanos o superiores a los \$100.000/ha/año. Siendo estos mayores (\$341.344/ha/año) para la alternativa de revestir la totalidad del canal principal y además, realizar la adecuación de los lotes para ser regados por melgas rectangulares.

Se concluye, que desde todo punto de vista, es rentable para la plantación realizar inversión en el mejoramiento de la eficiencia del sistema de riego. En términos generales, se puede decir, que por cada punto porcentual que la plantación logre subir en eficiencia, tendrá un beneficio económico de \$15.100/ha/año.

Además, se debe considerar que el análisis sólo contempló

el efecto que tiene sobre la producción el mejorar la eficiencia para el verano de enero a marzo y, como se sabe, existen otros períodos del año en los cuales también se presentan necesidades de riego. Por lo tanto, el hecho de tener un sistema más eficiente, implicaría que en estos períodos el déficit hídrico disminuya y se vean incrementos adicionales en la producción.

Comentarios finales

- Las condiciones actuales de eficiencia del uso del agua de la plantación indican que de 100 litros de agua almacenados en el reservorio, solo 5,8 llegan a la zona radical de la palma, perdiéndose cerca de 65 litros en la conducción y 34 en la aplicación.
- El canal de conducción del reservorio a la plantación posee una eficiencia total de 50,6%. Sin embargo, el tramo más crítico corresponde a los últimos 500 m en donde la eficiencia parcial es de 56% y en sus primeros 150 m las pérdidas alcanzan a ser de 14,5 %/100m de canal.
- Es imposible contar con la disponibilidad de agua y la infraestructura para garantizar el caudal neto requerido. Por lo tanto, la principal alternativa con

que cuenta la plantación es trabajar en el mejoramiento de la eficiencia tanto en la conducción, como en la aplicación.

- Según los resultados obtenidos, es necesario trabajar en mejorar la eficiencia del sistema para que se puede llegar a tener algún beneficio económico por la construcción del reservorio.
- Las condiciones de baja retención de humedad de los suelos y escasa adecuación al momento de la siembra son factores preponderantes en las altas pérdidas de agua en la aplicación.
- Las condiciones de eficiencia encontradas en el presente trabajo, son muy similares a las encontradas en otras plantaciones de la zona, utilizando una metodología de evaluación similar.

Agradecimientos

Cenipalma agradece la colaboración de todo el personal técnico y administrativo de la plantación Palmeras de Alamosa, municipio de El Paso (Cesar). Adicionalmente, al Fondo de Fomento Palmero administrador por Fedepalma por su aporte a la investigación y al señor Miguel Bohórquez Moreno.

Bibliografía

- Colorado C, LE. 1972 *Revestimiento de los Canales de Riego*, Seminario de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Cortes M, EA. 1979 *Métodos y equipos para la construcción y conservación de canales*. Seminario de Ingeniería Agrícola. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Grassi, CJ. *Diseño y operación de riego por superficie*. Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras. Mérida- Venezuela.
- INAT. 1994. *Curso de Capacitación de Riego*. Ministerio de Agricultura. Popayán (Cauca). 250p.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-ideam. 1999. *Mediciones Hidrométricas*, Subdirección de Hidrológica, Bogotá.
- Javela P; Chacon L; Corredor J; 2002. *Riegos*. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá DC.
- Kraatz DB. *Revestimiento de Canales de Riego*. Colección FAO: Fomento de tierras y aguas. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma.
- Materon, M, H. 1977. *Obras Hidráulicas Rurales*, Editorial Universidad del Valle. Cali.
- Manjarrés, M; Mosquera, M. 2004. Aplicación de vectores autorregresivos (VAR) para determinar los efectos de variables climáticas sobre la producción de fruto de palma. Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite – Cenipalma. *Ceniavances* (Colombia) 11:1-4.
- Mejía, J. 2001. Consumo de agua por la palma de aceite y efectos del riego sobre la producción de racimos, una revisión de literatura. *Palmas*, (Colombia) 21(1) 51-57. Santafé de Bogotá DC.

