



Revista Logos Ciencia & Tecnología

ISSN: 2145-594X

ISSN: 2422-4200

Policía Nacional de Colombia

Valverde Granja, Agustín; Vargas Galván, Giovanni Andrés;  
García Arboleda, Mauricio; Díaz Figueroa, John Edison  
Impacto de la implementation del sistema de riego con energía solar en cultivos de limón  
Revista Logos Ciencia & Tecnología, vol. 14, núm. 2, 2022, Mayo-Agosto, pp. 90-107  
Policía Nacional de Colombia

DOI: <https://doi.org/10.22335/rict.v14i2.1571>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=517775405007>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org



Sistema de Información Científica Redalyc  
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso  
abierto

# Impacto de la implementación del sistema de riego con energía solar en cultivos de limón

## Impact of the Implementation of a Solar Energy Irrigation System on Lemon Crops

## Impacto da implementação da irrigação com energia solar nas culturas de limões

Agustín Valverde Granja<sup>a</sup> | Giovanni Andrés Vargas Galván<sup>\*b</sup> | Mauricio García Arboleda<sup>c</sup>  
John Edisson Díaz Figueroa<sup>d</sup>

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-9597-2803> Universidad de Ibagué, Ibagué, Colombia

<sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5034-8476> Universidad de Ibagué, Mariquita, Colombia

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5073-1464> Agrosavia, Florencia, Colombia

<sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3216-9041> Policía Nacional de Colombia, Mariquita, Colombia

- Fecha de recepción: 2022-03-13
  - Fecha concepto de evaluación: 2022-05-19
  - Fecha de aprobación: 2022-05-26
- <https://doi.org/10.22335/rlct.v14i2.1571>

**Para citar este artículo/To reference this article/Para citar este artigo:** Valverde-Granja, A., Vargas-Galván, G.A., García-Arboleda, M., & Díaz-Figueroa, J.E. (2022). Impacto de la implementación del sistema de riego con energía solar en cultivos de limón. *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, 14(2), 90-107. <https://doi.org/10.22335/rlct.v14i2.1571>

### RESUMEN

Se presenta el dimensionamiento de un sistema de riego aplicado a un cultivo de limón, haciendo uso de la energía solar. Dicho riego cumplió con valores de evapotranspiración potencial (ETP) de 4,31 mm/día y Uso Consuntivo (UC) de 1,85 mm/ha/día, cuya matriz experimental se encuentra compuesta por tres surcos de 57 árboles con requerimiento de 64,91 litros/árbol/día, utilizando goteros de una descarga de 4 litros/hora. El estudio demuestra en un nivel altamente significativo que la humedad se concentra en una profundidad de 15 cm, influenciado por las características físicas arenosas del suelo. Para el requerimiento del agua de riego, se dimensiona un sistema solar, obteniendo un arreglo de diez paneles en serie y dos en paralelo para un total de veinte en conjunto, un inversor de una capacidad de 5,0 kWp, para alimentar una bomba de 2 HP y una vivienda, con consumo promedio de 1,5 kWp, conectado a una red de baja tensión de 220V. La eficiencia global del sistema se registró en el rango de 10 y 14 % y la potencia máxima de salida del sistema fotovoltaico se alcanzó entre las 10 y las 14 horas con un 84 % de la capacidad total instalada (5,2 kWp).

**Palabras clave:** sistema de riego, energía solar, eficiencia global, evapotranspiración, limón.

### ABSTRACT

This paper presents the dimensioning of an irrigation system applied to a lemon crop. Making use of solar power, it satisfied the Potential Evapotranspiration (PET) values of 4.31 mm/day and Consumptive Use (CU) of 1.85 mm/ha/day, whose experimental matrix is composed by three furrows of 57 trees with a requirement of 64.91 liters/tree/day, using dripping irrigation systems with a water discharge of

4 liters/hour. The study demonstrates, at a very significant level, that humidity concentrates at a depth of 15 cm. which is influenced by the sandy physical characteristics of the soil. Thus, for the irrigation water requirement, it is dimensioned a solar system obtaining a setting of 10 panels in series and 2 others in parallel, for a total of 20 as a whole, a capacity inverter to power a 2HP pump and a house with an average consumption of 1.5 kWp. The global efficiency of the system was registered in the range of 10 and 14%, and the maximum output power of the photovoltaic system was reached between the 10:00 and 14:00 hours with an 84% of the total capacity installed (5.2 kWp).

**Keywords:** irrigation system, solar power, global efficiency, evapotranspiration, lemon.

## RESUMO

É apresentado o dimensionamento de um sistema de irrigação aplicado a uma cultura de limão, utilizando energia solar. Este sistema de irrigação obedeceu a valores de evapotranspiração potencial (ETP) de 4,31 mm/dia e Utilização Consuntiva (UC) de 1,85 mm/ha/dia, cuja matriz experimental é composta por três filas de 57 árvores com um requisito de 64,91 litros/árvore/dia, utilizando gotejadores de uma descarga de 4 litros/hora. O estudo mostra a um nível altamente significativo que a humidade está concentrada a uma profundidade de 15 cm, influenciada pelas características físicas arenosas do solo. Para as necessidades de água de rega, dimensiona-se um sistema solar, obtendo-se uma disposição de dez painéis em série e dois em paralelo para um total de vinte juntos, um inversor com uma capacidade de 5,0 kWp, para alimentar uma bomba de 2 HP e uma casa, com consumo médio de 1,5 kWp, ligada a uma rede de baixa tensão de 220V. A eficiência global do sistema foi registada na gama de 10 e 14% e a potência máxima do sistema fotovoltaico foi atingida entre 10 e 14 horas com 84% da capacidade total instalada (5,2 kWp).

**Palavras-chave:** sistema de irrigação, energia solar, eficiência global, evapotranspiração, limão.

## Introducción

Este estudio se centra en las posibilidades del uso de aguas subterráneas para el sistema de riego con energía solar. El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente-PNUMA (2003) especifica que:

De los 1410 millones de km<sup>3</sup> de agua que cubren la superficie terrestre, el 97,3 % corresponde a agua existente en los mares y el 2,7 % es agua dulce apta para el consumo humano, pero de esta cantidad el 0,87 % se encuentra en los polos en forma de hielo (permafrost), el 0,03 % es agua de río, lagos y pantanos que está siendo utilizada por gran parte de la humanidad; el restante 1,8 % corresponde a aguas subterráneas. (citado por Barbosa Pinzón, 2010, p. 6)

Por otra parte, Doll & Pachauri afirman lo siguiente:

Existen algunos países en vía de desarrollo con un alto porcentaje de territorio sin acceso al sistema eléctrico nacional. Es el caso de Ecua-

dor, Colombia, Mali, Gambia, entre otros, en donde, en el mejor de los casos, se utiliza agua sin tratar proveniente de ríos, lo que obliga a la población a caminar grandes trayectos para acceder a este líquido vital. (2010, p. 5668)

Las primeras investigaciones de bombeo fotovoltaico (FV), fueron realizadas en 1978 (Barlow et al., 1991); hoy en día, el número de sistemas instalados en el mundo aumenta de forma exponencial. Algunos estudios (Simens Solar Industries, 1996) muestran una operación de unas diez mil unidades en 1994; se estima que para el año 2020 esa cantidad se ha incrementado a medio millón (European Commission, 2010). Entre los países que han implementado la experiencia de bombeo FV encontramos a Mali (E.U, s.f.) con 40 sistemas; India (International Energy Agency, 2001), con 3.820; Filipinas, con 150 (The American Society of Mechanical Engineers-ASME, 2001); Marruecos, con 23; Gambia, con 50; y Argelia con 60 sistemas (Abella & Chenlo Romero, s.f.). Estudios realizados por Zavala et al. (2020) han demostrado que el bombeo FV puede ser competitivo con el diésel, en un ciclo hidráulico comprendido entre 200 y 1500 m<sup>3</sup>/día.

Las principales aplicaciones del bombeo solar FV están relacionadas con el abastecimiento de agua en zonas rurales y el riego en cultivos agrícolas (Okakwu et al., 2022).

El abastecimiento de agua en zonas rurales con sistema de bombeo solar FV, es aplicado para el consumo humano o de animales (Tan et al., 2022). La cantidad de agua destinada para el consumo humano es muy difícil de cuantificar, puesto que depende de la localización y el estilo de vida de las personas que la usan; sin embargo, se ha estimado un rango de entre 20 y 40 litros/día por persona como la cantidad de agua requerida para satisfacer las necesidades básicas (Gualteros & Rousse, 2021). Estas condiciones se pueden lograr con una potencia hidráulica de 0,3 W, para un periodo de uso de 8 horas y con una elevación de agua de 20 m (Okakwu et al., 2022). Para el consumo de animales se emplean desde 50 litros/día para un caballo hasta 0,3 litro/día para un ave de corral (Gualteros & Rousse, 2021).

Los requerimientos de agua para riego dependen del tipo de cultivo que se vaya a regar, la demanda oscila entre 100 m<sup>3</sup>/día por hectárea en los meses secos, hasta volúmenes de cero en los meses de invierno (Gualteros & Rousse, 2021). En países en vía de desarrollo, en el área agrícola para pequeñas granjas, las necesidades de agua por hectárea están en el rango de 1 a 5 litros/s, en alturas manométricas superiores a 7 metros (Okakwu et al., 2022).

Existen diferentes tipos de sistemas de riego, cada uno es importante de acuerdo con la labor que desempeñe. Los sistemas de riego independientes no requieren de un banco de batería para almacenar la energía, eso los convierte en un campo activo de investigación (Yahyaoui et al., 2014; Yu et al., 2011) porque son ambientalmente eficientes y en la actualidad están siendo usados en todo el mundo para riego en sistemas agrícolas (Yahyaoui et al., 2013; Yahyaoui et al., 2016; Carroquino et al., 2015). En los sistemas de riego fotovoltaico directos no se requiere acumular agua ni energía (Hamidat & Benyoucef, 2009); como su nombre lo indica, en esos sistemas el agua es bombeada directamente al cultivo, eso disminuye los costos del reservorio y las pérdidas por evaporación (Reca et al., 2015). En esos casos también se requiere

una sincronización entre la producción de energía y los requerimientos de bombeo, con el fin de evitar desperdicios (López-Luque et al., 2017), de tal manera que se debe cumplir el balance de energía eléctrica. Además, la energía eléctrica generada debe ser igual a la consumida por el sistema (Campana et al., 2013; Gao et al., 2013), este balance se encuentra sincronizado en forma natural, puesto que el consumo de agua de las plantas y la producción de energía del sistema fotovoltaico tienen una relación directa con la radiación solar (Posadillo & López-Luque, 2008; Yahyaoui et al., 2016). También existen sistemas de riego fotovoltaico conectados directamente a la red eléctrica, para satisfacer los requerimientos de energía eléctrica de la vivienda y del riego agrícola. Este sistema de conexión permite guardar la energía no consumida en la red, para usarla cuando el sistema la requiera, eso evita las pérdidas de energía en temporada invernal y facilita la alta producción en época de verano (Rabiul Islam et al., 2017).

Con el fin de optimizar el costo económico de los sistemas de bombeo haciendo uso de la energía solar, se han realizado trabajos como el de Zhang et al. (2014) quien desarrolló un modelo de simulación FV, balanceando la demanda de agua con la generación de energía. Campana et al. (2013) implementaron un modelo de sistema de riego tomando como base la demanda de agua. Por su parte, Campana et al. (2015) y Benlarbi et al. (2004), minimizaron los costos del sistema de bombeo solar FV, mediante un modelo de simulación. Mérida et al. (2018), optimizaron un sistema de bombeo de agua mediante un algoritmo de eficiencia global difuso. También, mediante un algoritmo simple y eficiente, López-Luque et al. (2015) administraron en tiempo real el sistema de riego FV en una granja. Finalmente, Reca et al. (2016), usaron emisores no compensadores acoplados a una bomba de velocidad para variar el flujo en el sistema de riego en función de la energía fotovoltaica disponible.

Muchos países han desarrollado leyes que permiten acceder a costos razonables de la energía fotovoltaica, cuyo comportamiento es contrario al precio de la electricidad. Este ha aumentado en los últimos años, facilitando la competencia desde lo económico (Qoaidar & Steinbrecht, 2010). Como

quiera que las investigaciones realizadas hasta el momento se centran en la evaluación de los diferentes sistemas de bombeo solar fotovoltaico, mediante modelos simulados que buscan minimizar los costos o balancear la producción de energía con los requerimientos del consumo de agua, todos independientes y aplicados a los sistemas de bombeo directo. En este trabajo se evaluó un sistema de bombeo que hace uso de energía solar, aplicado a un cultivo de limón, con disposición de energía eléctrica para alimentar una vivienda y conectado a una red eléctrica de baja tensión.

## Método

La implementación del sistema de bombeo hidráulico con energía solar para el cultivo de limón fue realizada en el municipio de Guamo, Tolima, en las coordenadas de Latitud 04° 35' 46.3215" N y Longitud 74° 04' 39.0285" W. De acuerdo con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM, en Guamo:

Los veranos son cortos, tórridos, bochornosos y mayormente nublados y los inviernos son cortos, calientes, opresivos, mojados y nublados, la temperatura generalmente varía de 23 °C a 37 °C y rara vez baja a menos de 22 °C o sube a más de 40 °C. De igual forma, la mayoría de la lluvia cae durante los 31 días centrados alrededor del 20 de abril, con una acumulación total promedio de 150 milímetros y la fecha aproximada con la menor cantidad de lluvia es el 4 de agosto, con una acumulación total promedio de 48 milímetros. Los sistemas productivos actuales se mantienen en una constante contextualización a las realidades nacionales e internacionales. (2020)

De igual forma, se debe mencionar que los sistemas de riego destinados a optimizar la eficiencia del uso del agua en la agricultura se han vuelto esenciales debido a las crecientes limitaciones de agua que enfrenta actualmente ese sector. Por lo tanto, se recomienda evaluar las respuestas de los cultivos a diferentes sistemas y estrategias de riego para encontrar las opciones más eficientes para cada caso específico (Martínez-Gimeno et al., 2018). Eso servirá para enfrentar la problemática

actual que hace que varias regiones del mundo, especialmente en los países del Sur, no tengan recursos suficientes de agua (Hamidat & Benyoucef, 2009, p. 1489).

## Definición de la metodología del sistema de riego

Para lograr establecer las necesidades de riego del limón en la zona de influencia del estudio y siguiendo la propuesta de Jaramillo Robledo (2006), se utilizó el método FAO Penman-Monteith, de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación. En ese método:

Se establece la relación exponencial entre la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) y la altitud, y para estimar la evapotranspiración se propuso la expresión empírica presentada en la ecuación 1, aplicable en estudios generales de zonificación climática de las cuencas de los ríos Cauca y Magdalena, localizadas en la región Andina de Colombia, para altitudes entre 170 y 3.700 msnm. (p. 17)

$$ET_o = 4,37 \exp(-0,0002 \cdot A). \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

ET<sub>o</sub> = Evapotranspiración, (mm/día).

A = Altitud, m.

Para el cálculo del uso consuntivo (UC), se utilizó la metodología para riegos localizados que propone Pizarro (1996), presentada en la ecuación 2.

$$UC = K_c \cdot K_L \cdot ETP / E_a. \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

UC = Uso consuntivo, (mm/día).

K<sub>c</sub> = Coeficiente de cultivo.

K<sub>L</sub> = Coeficiente de localización.

ETP = Evapotranspiración potencial (mm/día).

E<sub>a</sub> = Eficiencia de aplicación del sistema de riego.

De acuerdo con la FAO (Allen et al., 2006, p. 190), se debe realizar una corrección del UC, por advección (Va), que depende del tamaño del área por regar; por uniformidad (Cu), porque los terrenos no son totalmente planos; y, adicionalmente, hay defectos de fabricación en algunos de los orificios utilizados como goteros. Por último, fueron tenidas en cuenta las pérdidas por percolación (K). Estas correcciones se debieron tener en cuenta para las ecuaciones 3 y 4.

$$UC = KC * KL * Va * CL * ETP / (1 - K) * Cu \quad \text{Ec. 3}$$

$$K = 1 - Ea \quad \text{Ec. 4}$$

La demanda de agua (DA) se obtuvo a partir de un balance hídrico, representado en la ecuación 5.0.

$$DA = UC - Pe - Gw - AW \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

DA = Demanda de agua del cultivo (mm/día).

UC = Uso consuntivo (mm/día).

Pe = Precipitación efectiva (mm).

Gw = Aporte capilar.

AW = variación de almacenamiento de agua en el suelo (mm).

### Metodología utilizada en el diseño del sistema de riego solar fotovoltaico

En el desarrollo del diseño de la red fotovoltaica se utilizó la metodología propuesta por Valverde Granja (2017) y Vargas Galván et al. (2019), donde se sugieren los siguientes pasos:

#### a. Dimensionamiento del generador fotovoltaico. Se propuso haciendo uso de la ecuación 6.

$$PGFV = \sum_{i=1}^{12} \left[ \frac{E_i}{HSS_i * N_i * PR} \right] / 12 \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

PGFV = Potencia del generador fotovoltaico, en kW.

$E_i$  = Producción media de la electricidad mensual, en kWh/mes.

$HSS_i$  = Número de horas de irradiación solar estándar, media mensual de la localidad. Para poder conocer este valor se tiene el mapa de brillo solar proporcionado por la Unidad de Planeación Minero Energética-UPME (Unidad de Planeación Minero Energética-UPME, s.f.). También se puede determinar a partir de la información suministrada por el Software RETScreen (Natural Resources Canada, 2019).

$N_i$  = Número de días del respectivo mes, en días.

PR = Factor de rendimiento del sistema, el valor se encuentra entre 0,8 y 0,9, debido a que los paneles disminuyen su rendimiento, principalmente, por cuatro factores: un inadecuado control de calidad en la fabricación de los módulos, los efectos de la temperatura del panel, pérdidas por transmisión y pérdidas por suciedad acumulada en los paneles. En todas se estima una reducción de eficiencia del 5 % (Valverde Granja, 2017).

**b. Dimensionamiento del inversor.** Para el dimensionamiento del inversor se tuvo en cuenta el factor de dimensionamiento (FDI) que representa la relación que existe entre el generador fotovoltaico y el inversor. Para determinarlo se debe hacer uso de la ecuación 7.

$$FDI = \frac{\bar{P}_I}{PGFV} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

FDI = Factor de dimensionamiento del inversor.

$P_I$  = Potencia del inversor, en kW.

PGFV = Potencia del generador, en kW.

El factor del inversor depende principalmente de las características de la radiación solar que pueden incidir sobre el panel solar. A su vez, esas características dependen de la latitud de la ciudad y de la capacidad de los paneles para absorber la luz.



Una recomendación basada en evidencias empíricas, para áreas de baja variación de la irradiación durante el año, sugiere un factor entre 0,8 y 1 (Caamaño Martín, 1998).

### c. Selección del inversor y del tipo de panel solar.

Con base en la potencia necesaria para los paneles y el inversor calculada anteriormente, se seleccionó el tipo de panel e inversor que cumpla adecuadamente con estos parámetros, además de tener en cuenta su eficiencia, materiales y precio.

**d. Número máximo y mínimo de paneles conectados en serie.** El número de paneles en serie está directamente relacionado con el voltaje. Para su cálculo se debió hacer uso de las ecuaciones 8 y 9, que proporcionaron los números mínimo y máximo de paneles solares a conectar en serie.

$$N_s < \frac{V_{INV}^{max}}{V_{ca}(\text{módulo a } -10^{\circ}\text{C})} \quad \text{Ec. 8}$$

$$N_{smin} > \frac{V_{INV}^{min}}{V_{max}(\text{módulo a } 70^{\circ}\text{C})} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

$N_s$  = Número máximo de módulos en serie.

$V_{INV}^{max}$  = Tensión máxima de entrada del inversor, en (V).

$V_{ca}(\text{módulo a } -10^{\circ}\text{C})$  = Tensión del circuito abierto del módulo a la temperatura de  $-10^{\circ}\text{C}$ .

$N_{smin}$  = Tensión mínimo del inversor, en (V).

$V_{INV}^{min}$  = Tensión mínima de entrada del inversor, en (V).

$V_{max}(\text{módulo a } 70^{\circ}\text{C})$  = Tensión máxima del módulo a la temperatura de  $70^{\circ}\text{C}$ .

Para conocer la tensión del circuito abierto del módulo a temperatura de  $-10^{\circ}\text{C}$  y la tensión máxima del módulo a la temperatura de  $70^{\circ}\text{C}$  se utilizaron las ecuaciones 10 y 11.

$$V_{ca}(\text{módulo a } -10^{\circ}\text{C}) = \left( V_{ca(CTS)} - \frac{35^{\circ}\text{C} * \Delta V_{(mV/^{\circ}\text{C})}}{1000} \right)$$

Ec. 10

$$V_{max}(\text{módulo a } 70^{\circ}\text{C}) = \left( V_{max(CTS)} + \frac{35^{\circ}\text{C} * \Delta V_{(mV/^{\circ}\text{C})}}{1000} \right)$$

Ec. 11

Donde:

$V_{ca(CTS)}$  = Tensión de circuito abierto del módulo fotovoltaico, en (V).

$\Delta V_{(mV/^{\circ}\text{C})}$  = Coeficiente de tensión diferencial, en (mV/ $^{\circ}\text{C}$ ).

$V_{max(CTS)}$  = Tensión de máxima potencia, en (V).

**e. Número máximo de paneles conectados en paralelo.** El número de paneles solares en paralelo está relacionado directamente con la corriente y se determinó a partir de la ecuación 12.

$$N_p < \frac{I_{FV}}{I_{max}} \quad \text{Ec. 12}$$

Donde:

$I_{FV}$  = Corriente de entrada del inversor, en (A).

$I_{max}$  = Corriente máxima de los módulos fotovoltaicos, en (A).

Para conocer la corriente de entrada del inversor se hace uso de la Ecuación 13.

$$I_{FV} = \frac{P_{INV}^{max}}{V_{inv}} \quad \text{Ec. 13}$$

Donde:

$P_{INV}^{max}$  = Potencia máxima DC del inversor, en (W).

$V_{inv}$  = Tensión máxima del inversor, en (V).

Para el cálculo de la potencia máxima de corriente directa (DC) del inversor, se utiliza el voltaje nominal del inversor y su corriente máxima. Estos

datos son obtenidos a partir de las características técnicas. El cálculo se obtuvo con la ecuación 14.

$$P_{max}^{INV} = V_{nom} * I_{maxentrada} \quad \text{Ec. 14}$$

**f. Determinar el área requerida para el montaje del sistema.** Para determinar el área total se utilizó la ecuación 15.

$$A = A_P + A_F + A_{EP} \quad \text{Ec. 15}$$

Donde el área total depende del área ocupada por los paneles solares  $A_P$ , el área necesaria para fijar los paneles a la plataforma  $A_F$  y el área ocupada por el espacio libre entre filas  $A_{EP}$ .

**g. Dimensionamiento del cableado.** Para la selección de los cables y las protecciones necesarias se utilizó la NTC 2050 (Icontec Internacional-ICONTEC, 1998).

## Diseño experimental

Se realizó un diseño experimental de parcela dividido en un bloque al azar (Jaramillo Robledo, 2006; Allen et al., 2006), con prueba de significancia DMS modificada, dada la distribución de los árboles en los surcos y la ubicación de los goteros acorde con los puntos cardinales, para la toma de lectura de humedad en cada una de las tres profundidades en el suelo. De esta manera, los bloques correspondieron a cada uno de los tres surcos, para un total de tres bloques, con tres parcelas o árboles tomados al azar. De esa manera, el arreglo factorial resultó en un  $4 \times 3 \times 3$  (riego gotero o punto cardinal x humedad según profundidad x surco de siembra), con tres réplicas (árboles).

## Metodología utilizada para la evaluación del sistema de riego

La información se dispuso en bloques que corresponden a los tres surcos aleatorios, en los cuales estaban dispuestos los árboles sobre los que —al azar— se hicieron tres lecturas en igual número de árboles, en cada uno de los puntos donde recibían riego con los cuatro goteros; estos estaban ubicados de acuerdo con los puntos cardinales.

Se promediaron las siete frecuencias de toma de lecturas, las cuales partieron del 5 de noviembre de 2019 hasta el 6 de marzo de 2020. Estas lecturas se sumaron y promediaron por cada punto cardinal a un solo dato de lectura por punto cardinal por árbol por surco, para las tres profundidades de registro de humedad en el suelo.

Este dato promedio para cada lectura, no se transformó, debido a que al aplicar la Prueba de Bartlett no hubo diferencia significativa en las medias entre un dato y otro.

## Análisis y discusión de resultados

### Sistema de Riego

Una vez aplicada la metodología propuesta en el apéndice 2.1, se obtienen valores de ETP de 4,31 mm/día y UC de 1,85 mm/ha/día. Como hay 285 plantas por ha, se requieren cerca de 64,91 litros/árbol/día, para el estado de desarrollo en que se encuentran. En este sentido, se utilizaron goteros de una descarga de 4 L/hora, lo cual da un tiempo de riego de 4,05 horas. Para ello se diseñó un sistema de riego conformado por 360 metros de manguera de 25 mm de diámetro, 390 metros de 16 mm de diámetro calibre 40 y 288 goteros de 4 L/h, en tres surcos de 57 árboles. Además, estos surcos tuvieron la pendiente requerida y el respectivo recorrido de la manguera según planos topográficos de los niveles del terreno (Tabla 1 y Figura 1).



Tabla 1

Valores de las variables involucradas en el cálculo de ETP y UC

| Variable | Valor utilizado | Valor recomendado                                                                                                                                     |
|----------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kc       | 0,6             | 0,55 cultivos con programas de control de malezas (Allen et al., 2006, p. 140).<br>0,85 cultivos sin control de malezas (Allen et al., 2006, p. 140). |
| KL       | 0,48            | Por la proyección de la sombra de la copa del árbol a mediodía.                                                                                       |
| Ea       | 0,85            | 0,85 – 0,90 para los sistemas de riego localizado.                                                                                                    |
| CL       | 1,20            | 1,15 y 1,2 (López et al., 1992).                                                                                                                      |
| Va       | 0,9             | 0,9 para 5 hectáreas (Allen et al., 2006, p. 190).                                                                                                    |
| Cu       | 0,85            | Para terrenos no planos y por defecto de fabricación de goteros.                                                                                      |
| Pe       | 0               | Para precipitación media diaria en la zona, es inferior a 5 mm.                                                                                       |
| Gw       | 0               | Para niveles freáticos bajos.                                                                                                                         |
| AW       | 0               | Por la alta frecuencia de operación.                                                                                                                  |

Figura 1

Instalación del sistema de riego con base al plano topográfico



## Evaluación del sistema de riego

Tabulada la información, se procedió a calcular la ANOVA (Análisis de varianza) para el arreglo factorial diseñado. El resultado arrojó lo siguiente.

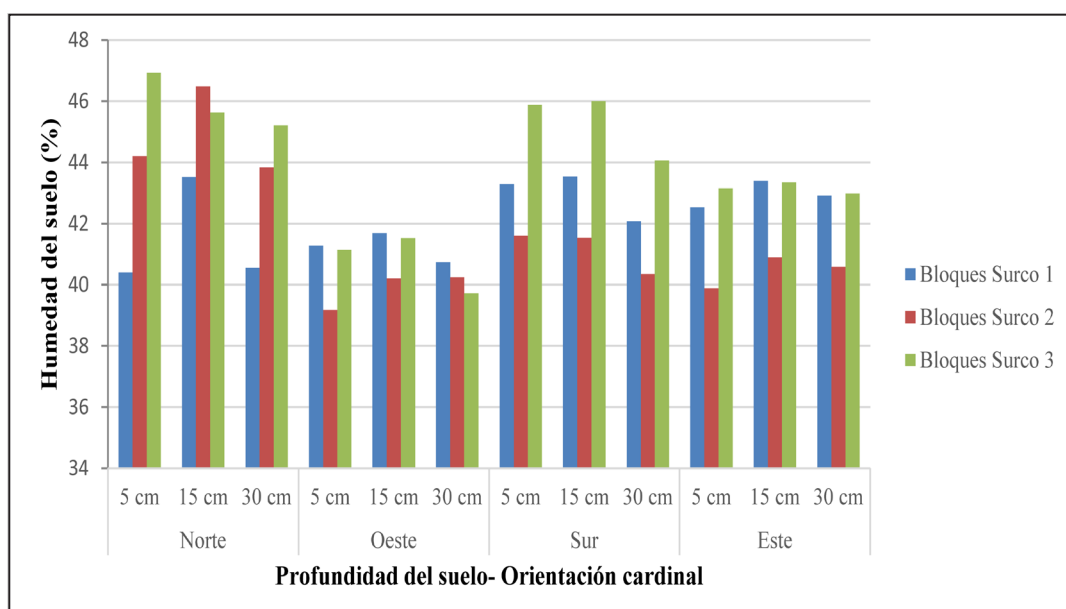
Hubo una diferencia altamente significativa entre las subparcelas, que estuvo marcada por la diversidad de la humedad tomada a profundidades de 5, 15 o 30 centímetros entre árbol por surco. Sin embargo, no hubo diferencia a nivel de las parcelas principales, puesto que fue indistinta la lectura de humedad de acuerdo con el gotero ubicado según el punto cardinal, entre árbol por surco. Se logró afirmar que las condiciones de horas de brillo solar, precipitación, humedad relativa o velocidad del viento se comportaron de igual manera a nivel microfocalizado, ya que en general fueron homogéneas, y por tanto no incidieron según la orientación geográfica del gotero en cada árbol por surco. De igual forma, no hubo diferencia entre los surcos o bloques, es decir, las condiciones del suelo y algunas de sus características de evapotranspiración, de textura y densidad fueron, en general, homogéneas entre los surcos del cultivo, lo que hace que no incidan en los niveles de humedad tomada.

Al comparar los datos agrupados por orientación cardinal del gotero contra los agrupados por profundidad de la toma de humedad, entre árbol por surco, se observó que esta interacción tampoco tuvo diferencia significativa. Lo que puede derivar en el planteo de la misma investigación, pero con un mayor número de surcos y de réplicas, asumiendo un surco control o de testeo, al cual no se le aplicaría riego por goteo; sin embargo, sus tomas de humedad por profundidad y por orientación cardinal sí serían tenidas en cuenta.

La precisión en la toma de lecturas (por frecuencia, hora y sitio) fue manejada impidiendo la afectación por factores exógenos a la investigación: presencia de animales, cansancio del investigador, defectos del dispositivo, errores de la toma y manipulación en laboratorio de la muestra de suelo, inexactitud de la profundidad, entre otros. También es resultado del alto número de datos recogidos (siete frecuencias por goteo por tres réplicas por tres surcos) desde los que provenía la lectura promedio estudiada en el arreglo factorial. El resultado fue un aceptable coeficiente de variación (2,09 % para los puntos cardinales, parcelas principales; y 1,62 % para la profundidad de muestreo, subparcelas) muy por debajo del 15 % para este tipo de ensayo experimental en campo (Figura 2).

**Figura 2**

*Mediciones de humedad del suelo a 5, 15 y 30 cm del nivel superficial del terreno*



El sistema de riego por goteo localizado a presión es el más eficiente en el suministro de agua (Bedoya & Ángeles, 2017, p. 117). Existen variables de tipo estructural que influyen en la distribución y eficiencia del agua a lo largo del sistema de goteo, que se traducen en pérdidas de presión (Bedoya & Ángeles, 2017, p. 122), influyendo en la uniformidad de la descarga. A pesar de ello, el estudio demuestra en un nivel altamente significativo que la humedad se concentra a una profundidad de 15 cm, influenciado por la textura arenosa del suelo. Este aspecto es fundamental para la gestión y planeación de actividades de cultivo como la aplicación de fertilizantes orgánicos depositados a esa profundidad, que además de mejorar los aspectos físicos del suelo arenoso, pueden ser la matriz para la recepción de la fertilización mineral, mejorando la retención de cationes, que es deficiente en este tipo de textura de suelo.

El rendimiento del sistema de bombeo fotovoltaico depende profundamente de la altura total de bombeo y la potencia máxima de la matriz fotovoltaica (Hamidat & Benyoucef, 2009). En este sentido, se aprovechó la alta oferta de radiación solar de la zona de estudio, aunada a una adecuada estructura del sistema con un volumen de tanques y su respectiva altura, dimensionados al área de cultivo, el sistema solar fotovoltaico se convirtió en una herramienta pertinente para pequeños productores de cítricos en condiciones similares.

Lo anterior puede derivar en una futura investigación (con igual número de parcelas y subparcelas, con los mismos goteros, puntos cardinales, frecuencia de tomas, árboles y surcos), en la que se considere asumir profundidades de 10, 15, 20 y 25 centímetros para descartar o confirmar lo que este experimento arrojó.

### Sistema solar

Los resultados obtenidos de las diferentes variables involucradas en el diseño del sistema de riego, permitieron seleccionar una motobomba eléctrica sumergible, de 2 HP y con un caudal de 35 L/min. Aplicando la metodología propuesta para el diseño del sistema de riego solar fotovoltaico, fueron obtenidas las características técnicas de los equipos involucrados en el sistema fotovoltaico, el cual tuvo un arreglo de 10 paneles en serie y 2 en paralelo para un total de 20 en conjunto, un inversor de una capacidad de 5,0 kWp, para alimentar una bomba de 2HP y una vivienda, con consumo promedio de 1,5 kWp. El sistema extrae agua de un pozo a 52 metros de profundidad y la almacena en un tanque elevado de 11,6 m<sup>3</sup> de capacidad. Este tanque descarga el agua por gravedad para el riego del cultivo de limón con una altura de 5,1 m, con respecto al nivel cero del terreno. Para garantizar la disponibilidad del sistema durante las 24 horas del día, se conectó a una red eléctrica de 220 voltios (Tabla 2 y Figura 2).

**Tabla 2**

*Características generales del sistema fotovoltaico y del bombeo hidráulico*

| Componente                            | Cantidad | Descripción                                                          | Referencia        |
|---------------------------------------|----------|----------------------------------------------------------------------|-------------------|
| <b>Panel solar policristalino</b>     | 20       | 260 W de potencia.                                                   | (INTI, 2017).     |
| <b>Inversor</b>                       | 1        | Monofásico con máxima potencia de salida de 5000 W.                  | (Fronius, 2020).  |
| <b>Electrobombas sumergidas de 4"</b> | 1        | Motobomba eléctrica sumergible de 2 Hp y caudal de 35 litros/minuto. | (PEDROLLO, 2020). |

### Parámetros de rendimiento

Para evaluar el rendimiento de un sistema fotovoltaico conectado a la red de baja tensión fueron tomados como referencia los parámetros de la norma IEC 61724. Esos parámetros son: la energía de salida, los rendimientos (referencia, módulos, final), la pérdida de energía de los módulos y del sistema, y las eficiencias (módulos, sistema, inversor)

(Adaramola & Vågnes, 2015; Díez-Mediavilla et al., 2012; Ayompe et al., 2011; Mpholo et al., 2015; Ark Kumar et al., 2014; Padmavathi & Arul Daniel, 2013). Estos parámetros de rendimiento normalizados son relevantes, puesto que proporcionan una base bajo la cual los sistemas fotovoltaicos ligados a la red pueden compararse bajo diversas condiciones de funcionamiento (Adaramola & Vågnes, 2015).

### Figura 3

Sistema de riego con energía solar instalado y funcionando



### Evaluación del sistema solar

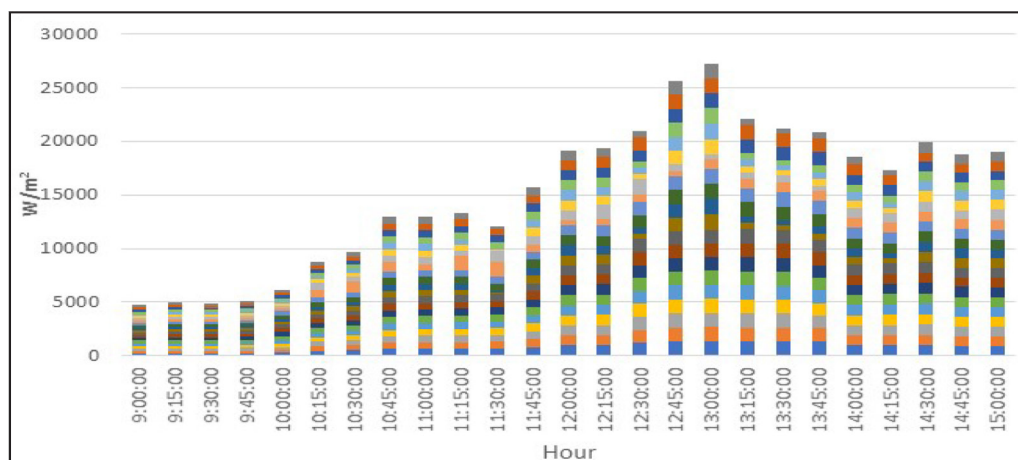
Las variables medidas del sistema fotovoltaico para el bombeo hidráulico del riego en el cultivo de limón —realizadas en el horario de 9 am a 3 pm, a intervalos de tiempo de 15 minutos— permitieron confirmar que la radiación solar registrada cada 15 minutos tiene un comportamiento homogéneo para todos los días de la semana, con valores mínimos promedio de  $240 \text{ W/m}^2$  sobre las 9 y las 10 am. Entre las 10 y las 11 am, la radiación solar varía en el intervalo de 350 a  $600 \text{ W/m}^2$ , alcanzando un valor

promedio de  $900 \text{ W/m}^2$  sobre el medio día. En la hora y media siguiente registró valores superiores a  $1000 \text{ W/m}^2$ , y terminó con valores promedios de  $850 \text{ W/m}^2$  hacia las 15 horas (Figura 3).

La información recolectada y analizada permite afirmar que la disponibilidad de radiación solar en el área de estudio es de 5 horas, a un valor estándar de radiación solar de  $1000 \text{ W/m}^2$ . Este valor coincide con lo reportado en el mapa de brillo solar elaborado por la UPME y los valores que se obtienen a través del Software RETScreen.

### Figura 4

Comportamiento de la radiación solar en el área de estudio



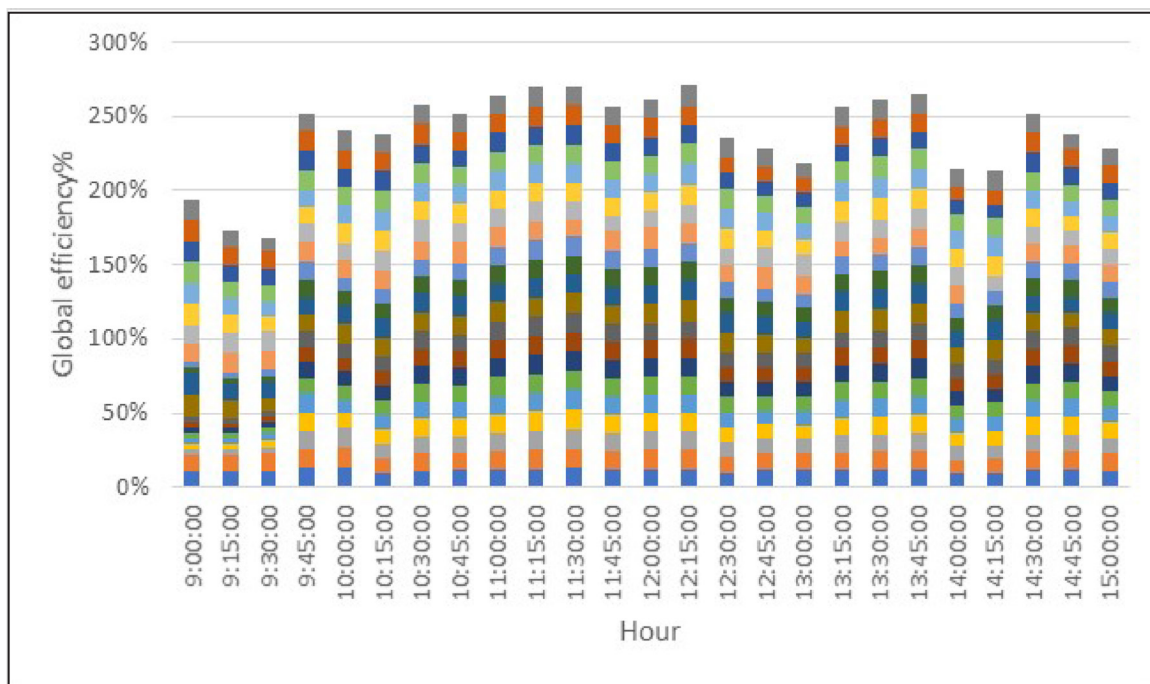


La eficiencia global del sistema tiene un comportamiento constante para los diferentes intervalos de tiempo, con valores mínimos del 8 % durante las primeras horas de la mañana y luego casi constante promediando los 13,5 % durante el resto del día (Figura 4). Por lo anterior se puede deducir que los paneles solares se encontraban trabajando a su máxima eficiencia durante la mayor parte del día, y que las pérdidas de eficiencia a través del sistema de conexión de los paneles y el inversor es muy

baja. Adicional a lo anterior se logró ratificar que el sistema no es afectado por el factor de sombra o ensuciamiento de los paneles. La relación de potencia producida y potencia instalada varió entre un 0,1 kW/kWp, en las primeras horas de la mañana, y un 0,84 kW/kWp, al mediodía, con valores máximos de 0,97 kW/kWp durante algunos días. Eso ratifica que el sistema trabajó al 97 % de su capacidad como máximo.

**Figura 5**

*Comportamiento de la eficiencia global del sistema solar instalado*

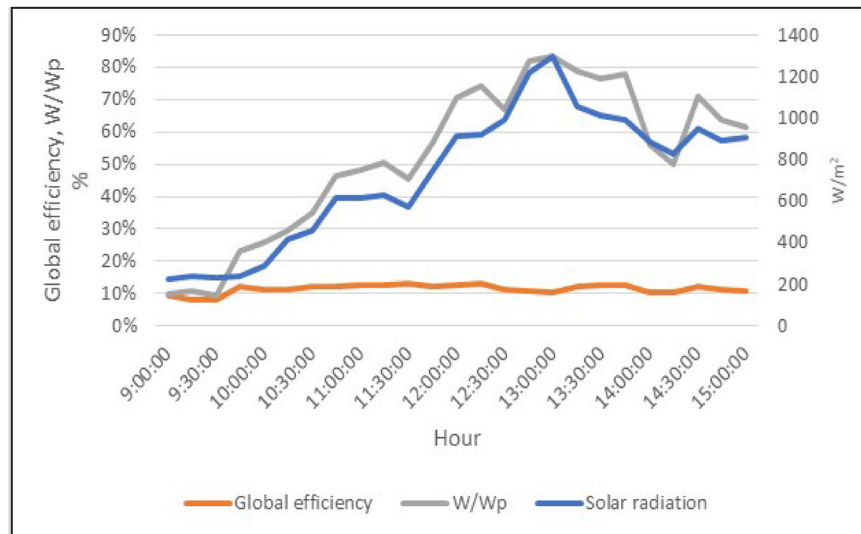


Al comparar la eficiencia global, la relación de energía producida sobre la energía instalada y la radiación solar (Figura 5), se logró apreciar que la eficiencia global del sistema se mantiene en un valor promedio constante de 13,5 %. La radiación solar y la relación de la energía producida sobre la energía instalada siguen una misma trayectoria, que es menor al comienzo de la jornada (sobre las 9:00 horas), aumenta al mediodía y disminuye en horas de la tarde. Para valores mínimos de radiación solar  $240 \text{ W/m}^2$ , la relación se mantiene sobre 0,1 W/Wp, alcanzando valores máximos de 0,84 W/Wp para valores de radiación solar de  $1200 \text{ W/m}^2$ . Por lo anterior, se

puede afirmar que el sistema respondió de forma adecuada, con un comportamiento normal para sistemas de este tipo, aumentando su capacidad de producción para valores mayores de radiación solar y disminuyendo para valores menores.

**Figura 6**

*Comparación de la radiación solar, la relación de energía producida sobre la energía instalada y la eficiencia global del ciclo*



Se han realizado varios estudios relevantes sobre instalaciones de sistemas de bombeo de agua fotovoltaica, realizados entre 1981 y 2018 (Carrelo et al., 2020), los cuales mostraron una potencia de entre 0,5 y 3 kWp. Además, hay otras publicaciones que se concentran en el análisis económico de sistemas bombeo de agua fotovoltaica cuya potencia está entre 1 y 8 kWp. Esos estudios indican que la potencia del sistema fotovoltaico para el bombeo hidráulico solar propuesto (de 5,2 kWp) está contenido dentro de los modelos implementados y analizados económicamente para determinar su viabilidad financiera y su uso técnico y tecnológico, en este caso para el sistema de riego de cultivos de limón.

En su artículo de revisión sobre los sistemas de bombeo de agua con energía solar, Aliyua et al. (2018) lograron determinar los siguientes porcentajes de eficiencia. Para bombas de 300 W se pueden tener una eficiencia de entre 11,4 y 12,5 % del sistema fotovoltaico; para las de 1200 W, una eficiencia del 14 %; y para las bombas de 1500 W (2 HP), se obtiene una eficiencia aproximada del 14,3 %. Eso permite concluir que entre mayor sea la potencia generada por el sistema fotovoltaico, mayor es su eficiencia y más rápido retorna la inversión realizada.

Teniendo en cuenta lo anterior, en este sistema fotovoltaico para el bombeo hidráulico de riego en el cultivo del limón se logró determinar que la eficiencia está en el rango definido para bombas sumergibles de 1500 W, puesto que su eficiencia global está entre el 10 y el 14 %. Esa variación depende de la radiación solar y la hora. Para eficiencias del 10 % se requiere de una radiación solar promedio de 240 W/m² y de una potencia promedio del inversor de 296,75 W. Por su parte, para la eficiencia del 14 % se logró determinar una radiación solar promedio de 980 W/m² y una potencia de salida del inversor promedio de 4400 W. Además, las horas de las eficiencias más altas del 10 al 14 % están entre las 10:30 y las 15:00 horas, alcanzando valores de potencia de entre 1584 y 5043 W.

En la Figura 5 se puede observar que la potencia máxima de salida del sistema fotovoltaico se alcanzó entre las 10 y 14 horas, con un 84 % de la capacidad total instalada (5,2 kWp). Este porcentaje es similar a los encontrados por Burger & Rüther (2006) y por Macêdo & Zilles (2007), que registraron un 70 %; también, está muy cerca de otras referencias que indican el 80 % y el 100 % (Islam et al., 2003). La energía producida (final) durante el período dividida por la potencia nominal del sistema es de 1432,2 kWh / kWp, valor que es inferior al



que se encuentra en lugares como Tiruchirappalli, India (1600 kWh / kWp); Málaga (España) o Israel (1840 kWh / kWp). También hay que decir que es superior a los registrados en Holanda (700 kWh / kWp); Creta, Grecia (1336,4 kWh / kWp); Calabria, Italia (1230 kWh / kWp); España (1.339 kWh / kWp); India (1372 kWh / kWp); Alemania (730 kWh / kWp) y Suiza (790 kWh / kWp) (Mpholo et al., 2015).

## ■ Conclusiones

Se implementó un sistema de riego para 57 árboles con requerimiento de 64,91 litros/árbol/día, utilizando goteros de una descarga de 4 litros/hora, para cumplir con un tiempo de riego de 4,05 horas. El estudio demuestra, en un nivel altamente significativo, que la humedad se concentra en una profundidad de 15 cm, influenciada por las características físicas arenosas del suelo. Este aspecto es fundamental para la gestión y planeación de actividades de cultivo como la aplicación de fertilizantes orgánicos depositados a esa profundidad. Dichos productos mejoran los aspectos físicos del suelo arenoso, sobre todo en municipios del departamento del Tolima y de todo el país, en donde se cultiva y comercializa limón en altas temperaturas ambientales. En este caso, se buscó aumentar la productividad, calidad y cantidad de zumo a extraer en procesos de postcosecha y transformación del fruto.

Para el requerimiento del agua de riego se dimensionó un total de 20 paneles en conjunto, un inversor de una capacidad de 5,0 kWp, para alimentar una bomba de 2 HP y una vivienda, con consumo promedio de 1,5 kWp, conectado a una red de baja tensión de 220V. Adicionalmente, el sistema contempla como elemento acumulador de energía la misma agua de bombeo ubicada en un tanque elevado, en reemplazo de las baterías convencionales. Esta alternativa de almacenamiento de energía potencial representa un cambio en el sistema convencional de almacenamiento energético (*energy storage*) de tipo químico en sistemas solares, que representa incluso un incremento en la eficiencia del sistema, teniendo en cuenta que el propósito final es el suministro de agua.

Los resultados y productos del proyecto de investigación se lograron obtener a través de un trabajo articulado con las asociaciones de cultivo de limón y sus afiliados en el municipio de Guamo (Tolima), y específicamente con la finca seleccionada como estudio de caso, puesto que luego de una caracterización topográfica del terreno, se realizaron los diseños experimentales por surcos y parcelas de los árboles en el cultivo de limón (con su respectivo sistema de riego por bombeo hidráulico con energía solar). También se realizó un estudio de las profundidades del suelo para que la humedad fuera aprovechada de forma eficiente por los árboles.

En síntesis, se realiza un aporte innovador a los sistemas de riego con bombeo hidráulico por energía solar en los cultivos de limón, puesto que las energías convencionales (que incluso pueden no estar disponibles) son sustituidas por una fuente renovable que garantizará la satisfacción de la demanda hídrica del cultivo, lo cual permitirá a los cultivadores o productores no solamente mejorar su productividad, en términos de cantidad de limón producido y de su valor económico en el mercado, sino también acceder a beneficios tributarios a través de la Ley 1715 de 2014 y de su marco normativo. Todo el proceso permitirá que el costo o inversión económica realizada pueda ser recuperado en la menor cantidad de años.

Finalmente, se especifica que en el departamento del Tolima se da el único caso de sistema de riego con bombeo hidráulico por energía solar conectado a red (*On Grid*) entre cultivos de limón y otros productos. Lo anterior sirve como línea base para realizar otras investigaciones en el departamento con respecto a variables climáticas e intensidad y brillo solar, y su incidencia en la eficiencia y generación de energía eléctrica. Proyectos de este tipo también sirve para cuantificar la disminución del cambio climático en el país, con sistemas agrícolas más sustentables; y para mejorar la calidad y cantidad de los productos y subproductos obtenidos por los integrantes de las diferentes asociaciones, buscando con ello incrementar los indicadores de productividad, competitividad y Ciencia, Tecnología e Innovación en el departamento.

## ■ Agradecimientos

Los autores agradecen a la Gobernación del Tolima y a la Universidad del Tolima por su financiación mediante recursos del Sistema General de Regalías (SGR) derivados del Convenio número 043-2019 (Implementación de una unidad demostrativa para la transformación y el manejo de cosecha y poscosecha de limón), enmarcado en el Convenio Marco 2077-2018: “Desarrollo de ventajas competitivas mediante actividades I+D+i en ocho cadenas del sector agropecuario en el departamento del Tolima”.

## ■ Referencias

- Abella, M. A., & Chenlo Romero, F. (s.f.). *Sistemas de Bombeo Fotovoltaico*. [Trabajo de grado de Maestría, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas]. CIEMAT.
- Adaramola, M. S., & Vågnes, E. E. (2015). Preliminary Assessment of a Small-Scale Rooftop PV-Grid Tied in Norwegian Climatic Conditions. *Energy Conversion and Management*, (90), 458-465. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.028>
- Aliyua, M., Hassana, G., Saida, S. A., Siddiquic, M. U., Alawamid, A. T., & Elamind, I. M. (2018). A Review of solar-Powered Water Pumping Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (87), 61-76. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.010>
- Allen, R., Pereira, L., & Raes, D. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. FAO.
- Ark Kumar, K., Sundareswaran, K., & Venkateswaran, P. (2014). Performance Study on a Grid Connected 20 kWp Solar Photovoltaic Installation in an Industry in Tiruchirappalli (India). *Energy for Sustainable Development*, (23), 294-304. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2014.10.002>
- Ayompe, L., Duffy, A., McCormack, S., & Conlon, M. (2011). Measured Performance of a 1.72 kW Rooftop Grid Connected Photovoltaic System in Ireland. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 816-825. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.08.007>
- Barbosa Pinzón, A. (2010). *Agua potable para la humanidad y su conflicto mundial un asunto de la alta gerencia*. [Trabajo de grado de Especialización, Universidad Militar Nueva Granada]. RI UMNG. <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/3702>
- Barlow, R., McNeils, B., & Derrick, A. (1991). Status and Experience of Solar PV Pumping in Developing Countries. En A. Luque, G. Sala, W. Palz, G. Santos & P. Helm (Eds.), *Tenth E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference* (pp. 1143-1146). Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-3622-8\\_292](https://doi.org/10.1007/978-94-011-3622-8_292)
- Bedoya, M., & Ángeles, V. (2017). Comparación de métodos para estimar pérdidas localizadas en riego por goteo. *Tecnologías y Ciencias del Agua*, 3(4), 117-125. <http://dx.doi.org/10.24850/j-tyca-2017-04-07>
- Benlarbi, K., Mokrani, L., & Nait-Said, M. S. (2004). A Fuzzy Global Efficiency Optimization of a Photovoltaic Water Pumping System. *Solar Energy*, 77(2), 203-216. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.03.025>
- Burger, B., & Rüther, R. (2006). Inverter Sizing of Grid-Connected Photovoltaic Systems in the Light of Local Solar Resource Distribution Characteristics and Temperature. *Solar Energy*, 80(1), 32-45. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.08.012>
- Caamaño Martín, E. (1998). *Edificios fotovoltaicos conectados a la red eléctrica: Caracterización y análisis*. [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. Archivo Digital UPM. [http://oa.upm.es/1322/1/ESTEFANIA\\_CAAMANO\\_MARTIN.pdf](http://oa.upm.es/1322/1/ESTEFANIA_CAAMANO_MARTIN.pdf)
- Campana, P. E., Li, H., & Yan, J. (2013). Dynamic Modelling of a PV Pumping System with Special Consideration on Water Demand. *Applied Energy*, (112), 635-645. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.073>
- Campana, P. E., Li, H., Zhang, J., Zhang, R., Liu, J., & Yan, J. (2015). Economic Optimization of Photovoltaic Water Pumping Systems for Irrigation. *Energy Conversion and Management*, (95), 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.066>
- Carrelo, I. B., Hogan Almeida, R., Narvarte, L., Martínez-Moreno, F., & Carrasco, L. M. (2020). Comparative Analysis of the Economic Feasibility of Five Large-power Photovoltaic Irrigation Systems in the Mediterranean Region. *Renewable Energy*, (14), 2671-2682. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.030>
- Carroquino, J., Dufo-López, R., & Bernal-Agustín, J. L. (2015). Sizing of off-grid Renewable Energy Systems for Drip Irrigation in Mediterranean Crops. *Renewable Energy*, (76), 566-574. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.069>
- Díez-Mediavilla, Alonso-Tristán, C., Rodríguez-Amigo, M., García-Calderón, T., & Dieste-Velasco, M. (2012). Performance Analysis of PV Plants: Optimization for Improving Profitability. *Energy Conversion and*

- Management*, 54(1), 17-23. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.09.013>
- Doll, C., & Pachauri, S. (2010). Estimating Rural Populations without Access to Electricity in Developing Countries through Night-time Light Satellite Imagery. *Energy Policy*, 38(10), 5661-5670. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.014>
- E.U. (s.f.). *Experimentation of Pv water pumps in view of their optimization*. Final report.
- International Energy Agency (2001). *Technical Brochure N° 152 Solar Pumping in India*. Caddet, Renewable Energy. <https://www.yumpu.com/en/document/read/39509094/solar-pumping-in-india-caddet-renewable-energy>
- European Commission. (2010). *Photovoltaics in 2010*. European Commission Directorate-General for Energy.
- Fronius. (2020). *Productos y soluciones*. Fronius. <https://www.fronius.com/es/latin-america>
- Gao, X., Liu, J., Zhang, J., Yan, J., Bao, S., Xu, H., & Tao, Q. (2013). Feasibility Evaluation of Solar Photovoltaic Pumping Irrigation System Based on Analysis of Dynamic Variation of groundwater Table. *Applied Energy*, (105), 182-193. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.074>
- Gualteros, S., & Rousse, D. R. (2021). Solar Water Pumping Systems: A Tool to Assist in Sizing and Optimization. *Solar Energy*, (225), 382-398. <https://doi-org.ezproxy.unibague.edu.co/10.1016/j.soler.2021.06.053>
- Hamidat, A., & Benyoucef, B. (2009). Systematic Procedures for Sizing Photovoltaic Pumping System, Using Water Tank Storage. *Energy Policy*, (37), 1489-1501. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.12.014>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (1998). *NTC 2050. Código Eléctrico Colombiano*. ICONTEC. <https://www.icontec.org/lanzamiento-codigo-electrico-colombiano-ntc-2050/>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2020). *Tiempo y clima*. IDEAM. <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima>
- INTI. (2017). *Conozca nuestros productos*. INTI. <https://intipv.com/es/>
- Islam, S., Woyte, A., Belmans, R., & Nijs, J. (2003). Undersizing the Inverter for Grid-connection - Where is the optimum? En R. Hezel (Coord.). *The 18th Symposium Photovoltaische Solarenergie*, (pp. 414-419). Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut.
- Jaramillo Robledo, A. (2006). Evapotranspiración de referencia en la región Andina de Colombia. *Cenicafé*, 57(4), 288-298.
- López, J., Hernández Abreu, J., Pérez Regalado, A., & González Hernández, J. (1992). *Riego localizado*. MAPA-IRYDA.
- López-Luque, R., Martínez, J., Reca, J., & Ruiz, R. (2017). Análisis de viabilidad y gestión del riego en invernaderos mediterráneos con energía solar fotovoltaica. *Ribagua*, 1-10. <https://doi.org/10.1080/23863781.2017.1332806>
- López-Luque, R., Reca, J., & Martínez, J. (2015). Optimal Design of a standalone Direct Pumping Photovoltaic System for Deficit Irrigation of Olive Orchards. *Applied Energy*, (149), 13-23. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.107>
- Macêdo, W. N., & Zilles, R. (2007). Operational Results of Grid-connected Photovoltaic System with Different Inverter's Sizing Factors (ISF). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, (15), 337-352. <https://doi.org/10.1002/pip.740>
- Martínez-Gimeno, M. A., Bonet, L., Provenzano, G., Badal, A., Intrigliolo, D. S., & Ballester, C. (2018). Assessment of Yield and Water Productivity of Clementine Trees under Surface and Subsurface Drip Irrigation. *Agricultural Water Management*, (206), 209-216. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.05.011>
- Mérida, A., Fernández García, I., Camacho Poyato, E., Montesinos Barrios, P., & Rodríguez-Díaz, J. A. (2018). Coupling Irrigation Scheduling with Solar Energy Production in a Smart irrigation Management System. *Journal of Cleaner Production*, (175), 670-682. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.093>
- Mpholo, M., Nchaba, T., & Monese, M. (2015). Yield and Performance Analysis of the First Grid-connected Solar Farm at Moshoeshoe I International Airport, Lesotho. *Renewable Energy*, (81), 845-852. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.001>
- Natural Resources Canada. (21 de febrero de 2019). *RETScreen*. Natural Resources Canada. <https://www.nrcan.gc.ca/energy/retscreen/7465>
- Okakwu, I., Alayande, A., Akinyele, D., Olabode, O., & Akinyemi, J. (2022). Effects of Total System Head and Solar Radiation on the Techno-economics of PV Groundwater Pumping irrigation System for Sus-

- tainable Agricultural Production. *Scientific African*, (16), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01118>
- Padmavathi, K., & Arul Daniel, S. (2013). Performance Analysis of a 3 MWp Grid Connected Solar Photovoltaic Power Plant in India. *Energy for Sustainable Development*, 17(6), 615-625. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2013.09.002>
- Pedrollo (2020). *4SR Electrobombas sumergidas de 4"*. Pedrollo. <https://www.pedrollo.com/es/4sr-electrobombas-sumergidas-de-4/150>
- Pizarro, F. (1996). *Riegos localizados de alta frecuencia*. Mundi – Prensa.
- Posadillo, R., & López-Luque, R. (2008). A Sizing Method for Stand-alone PV Installations with Variable Demand. *Renewable Energy*, 33(5), 1049-1055. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.06.003>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2003). *Informe Distribución del Agua de la Tierra*. PNUMA. <https://www.un.org/esa/sustdev/sdissues/water/WWDR-spanish-129556s.pdf>
- Qoaidar, L., & Steinbrecht, D. (2010). Photovoltaic Systems: A Cost Competitive Option to Supply Energy to off-grid Agricultural Communities in Arid Regions. *Applied Energy*, 87(2), 427-435. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.012>
- Rabiul Islam, M. S., Pejush, & Kumar Ghosh, S. (2017). Prospect and Advancement of Solar Irrigation in Bangladesh: A Review. *Energy Reviews*, (77), 406-422. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.052>
- Reca, J., García-Manzano, A., & Martínez, J. (2015). Optimal Pumping Scheduling Model Considering Reservoir Evaporation. *Agricultural Water Management*, (148), 250-257. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.10.008>
- Reca, J., Torrente, C., López-Luque, R., & Martínez, J. (2016). Feasibility Analysis of a Standalone Direct Pumping Photovoltaic System for Irrigation in Mediterranean Greenhouses. *Renewable Energy*, (85), 1143-1154. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.056>
- Simens Solar Industries. (1996). *Photovoltaic Techonogy and systems desing, training manual*. Simens Solar Industries.
- Tan, C., Min, Wang, J., Geng, S., Niu, D., & Tan, Z. (2022). Feasibility Study on the Construction of Multi-energy Complementary Systems in Rural Areas—Eastern, Central, and Western Parts of China are Taken as Examples. *Energy*, 249(15), 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123571>
- The American Society of Mechanical Engineers (2001). *Philippines, Villages to Receive Electricity for the First Time*. ASME <https://www.modernpowersystems.com/news/newsphilippine-villages-to-receive-electricity-for-first-time>
- Unidad de Planeación Minero Energética (s.f.). *Mapas de Brillo Solar*. UPME. <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>
- Valverde Granja, A. (2017). *Implementação de uma rede experimental de geração distribuída (GD) com energia solar: estudo de caso da Universidade de Ibagué - Colômbia*. [Tesis doctoral, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita]. Repositorio Institucional UNESP. <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/151001>
- Vargas Galván, G. A., Gil-Baena, S. A., Díaz-Figueroa, J. E., & Otálora-Dueñas, L. M. (2019). Aprovechamiento de la energía solar para el Área Académica de la Escuela de Aviación Policial mediante un sistema fotovoltaico con conexión a red. *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, 11(2), 47-59. <https://doi.org/10.22335/rclt.v11i2.446>
- Yahyaoui, I., Chaabene, M., & Tadeo, F. (2013). An Algorithm for Sizing Photovoltaic Pumping Systems for Tomatoes Irrigation. M. Sánz, I. Colak, & F. Kurokawa (Coords.), *International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, (pp. 1089-1095). <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2013.6749915>
- Yahyaoui, I., Sallem, S., Kamoun, M., & Tadeo, F. (2014). A Proposal for off-grid Photovoltaic Systems with Non-controllable Loads Using Fuzzy Logic. *Energy Convers Manage*, (78), 835-842. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.091>
- Yahyaoui, I., Yahyaoui, A., Chaabene, M., & Tadeo, F. (2016). Energy Management for a Stand-alone Photovoltaic-wind System Suitable for Rural Electrification. *Sustainable Cities and Society*, (25), 90-101. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.12.002>
- Yu, Y., Liu, J., Wang, H., & Liu, M. (2011). Assess the Potential of Solar Irrigation Systems for Sustaining Pasture Lands in Arid Regions – A Case Study in Northwestern China. *Applied Energy*, (88), 3176-3182. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.02.028>
- Zavala, V., López-Luque, R., Reca, J., Martínez, J., & Lao, M. T. (2020). Optimal Management of a Multisector

Standalone Direct Pumping Photovoltaic Irrigation System. *Applied Energy*, (260). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114261>

Groundwater Level Based on Photovoltaic Water Pumping System. *Applied Energy*, (136), 1132-1137. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.05.045>

Zhang, J., Liu, J., Campana, P. E., Zhang, R., Yan, J., & Gao, X. (2014). Model of Evapotranspiration and