

MÉTODO DE PULSO DE CALOR Y FLUJO DE SAVIA PARA MEDIR LA TRANSPIRACIÓN EN EL CULTIVO DE CACAO

HEAT PULSE METHOD AND SAP FLOW FOR MEASURING TRANSPIRATION IN CACAO

Rutilo López López^{1*}; Waldo Ojeda Bustamante²;
Alejandro P. López Andrade¹; Ernesto A. Catalán Valencia³

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. km 1 Carretera Huimanguillo-Cárdenas. Huimanguillo, Tabasco. C. P. 86400. MÉXICO.

Correo-e: lopez.rutilo@inifap.gob.mx, (*Autor para correspondencia).

²Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhtémoc Núm. 8532, Col. Progreso, Jiutepec, Morelos. C. P. 62550. MÉXICO.

³Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera. km 6.5 Margen Derecha Canal de Sacramento. Gómez Palacio, Durango. C. P. 35140. MÉXICO.

RESUMEN

Se utiliza el método de pulso de calor para determinar la transpiración en función de la cantidad de agua que fluye dentro del tallo de cultivos perennes como el caso de cacao. Los objetivos del presente trabajo fueron, determinar la transpiración horaria a partir del medidor de flujo de savia y estimar los coeficientes de cultivo (Kc) en las diferentes etapas de desarrollo, para determinar los requerimientos hídricos del cultivo. Se concluye que el método de pulso de calor y flujo de savia estima de manera razonable la transpiración de árboles de cacao y detecta adecuadamente la dirección del flujo. La transpiración en el cultivo de cacao varía de 10 a 40 litros por día, en un árbol de 10 años de edad durante el periodo de requerimiento de riego. Los valores de coeficientes de cultivo Kc estimados con árboles de sombra durante su crecimiento y desarrollo varían de 0.6 a 0.7 en los meses de febrero a mayo, donde se requiere el riego debido al déficit hídrico que se presenta de acuerdo con el balance hidrológico del cultivo.

PALABRAS CLAVE: Flujo de savia, pulso de calor, evapotranspiración del cultivo, requerimiento de riego.

ABSTRACT

The heat pulse method is used for determining transpiration based on the amount of water flowing within the stem of perennial crops such as cacao. The objectives of this study were to determine hourly transpiration from a sap flow meter and estimate crop coefficients (Kc) at different stages of development in order to determine crop water requirements. It is concluded that the heat pulse method and sap flow reasonably estimate the transpiration of cacao trees and properly detect flow direction. Transpiration in cacao varies from 10 to 40 liters per day, in a 10-year-old tree during the irrigation requirement period. The Kc values estimated with shade trees during their growth and development vary from 0.6 to 0.7 in the months of February to May, when irrigation is required due to the water deficit that occurs according to the crop water balance.

KEYWORDS: Sap flow, heat pulse, crop evapotranspiration, irrigation requirement.

INTRODUCCIÓN

Las necesidades hídricas de un cultivo se relacionan con la evapotranspiración (ET), proceso del sistema suelo-planta que combina la pérdida de agua del suelo por evaporación y de la planta por transpiración (Burman y Pochov, 1994). Según la FAO (Allen *et al.*, 1998), la evapotranspiración de referencia (ET_0) se define como la máxima cantidad de agua que pierde un cultivo hipotético de referencia de una altura de 0.12 m, una resistencia de la superficie de $70 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$ y un albedo de 0.23 m, lo que asemeja a la ET que ocurre en una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme y crece activamente, y está bien regada.

Para estimar la evapotranspiración de un cultivo específico, se necesita considerar al propio cultivo y a las condiciones ambientales. Las condiciones meteorológicas determinan la demanda evaporativa, mientras que el dosel del cultivo y la humedad del suelo determinan la magnitud en que la demanda será satisfecha. La evapotranspiración de un cultivo puede ser estimada si están disponibles las mediciones o estimaciones de ET_0 . Estas mediciones o estimaciones representan la demanda meteorológica, y los coeficientes del cultivo representan la habilidad de esas plantas y del suelo para satisfacer esa demanda (Jensen y Wright, 1978).

La transpiración es la difusión de vapor de agua desde el interior de la hoja hacia la atmósfera y depende de la conductancia foliar al vapor de agua y el Déficit de Presión de Vapor (DPV). Entre las metodologías más utilizadas para evaluar la transpiración a distintas escalas se encuentran los lisímetros, los sistemas de intercambio de gases y los sensores de flujo de savia. Los métodos basados en la medida del estado hídrico del cultivo, incluyen técnicas que miden directamente las pérdidas de agua de una parte de la planta, de toda la planta o de un grupo de plantas, o bien se miden características relevantes de las plantas que facilitan su estimación. Los avances en electrónica han hecho que el uso de sensores que monitorean continuamente el estado hídrico de la planta facilite la toma de decisiones en la programación del riego. En este contexto, la transpiración puede ser estimada directamente en función de la cantidad de agua que fluye dentro del tallo usando un pulso de calor. Si se asume razonablemente que toda el agua que la planta transpira por el dosel debe primero pasar a través del tallo, entonces es posible inferir la transpiración a partir del flujo de savia por el tallo. Estos sensores de flujo de savia han tenido un notable desarrollo recientemente y existen algunas variantes metodológicas: método de disipación termal, método del balance de calor y el método de cociente de calor (ICT, 2012).

El principio de estos sensores de flujo de savia es aplicar una fuente de calor constante en la corriente de savia bruta o en su proximidad. La temperatura en las proximidades de esta fuente se ve perturbada más o menos, según la importancia del flujo de savia, y la pérdida de calor es directamente proporcional a este flujo. Este método proporciona una medida

INTRODUCTION

The water requirements of a crop are related to evapotranspiration (ET), a process of the soil-plant system that combines water loss from the soil by evaporation with that from the plant by transpiration (Burman and Pochov, 1994). According to the FAO (Allen *et al.*, 1998), reference evapotranspiration (ET_0) is defined as the maximum amount of water lost by a hypothetical reference crop with a height of 0.12 m, surface resistance of $70 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$ and an albedo of 0.23 m, which resembles the ET that occurs in an extensive surface of green, well-watered and actively growing grass of uniform height.

To estimate the evapotranspiration of a specific crop, the crop itself and its environmental conditions need to be considered. Weather conditions determine evaporative demand, while the crop canopy and soil moisture determine the extent to which that demand will be satisfied. Crop evapotranspiration can be estimated if ET_0 measurements or estimates are available. These measurements or estimates represent the meteorological demand, and crop coefficients represent the ability of these plants and the soil to meet that demand (Jensen and Wright, 1978).

Transpiration is the diffusion of water vapor from the interior of the leaf to the atmosphere and depends on leaf conductance to water vapor and Vapor Pressure Deficit (VPD). Among the methodologies most used to assess transpiration at different scales are lysimeters, gas exchange systems and sap flow sensors. Methods based on measuring the water status of a crop include techniques that directly measure water losses from a part of the plant, the entire plant or a group of plants, or relevant plant characteristics that facilitate their estimation are measured. Advances in electronics have led to the use of sensors that continuously monitor plant water status and thus facilitate decision-making in irrigation scheduling. In this context, transpiration can be directly estimated based on the amount of water flowing within the stem using a heat pulse. Reasonably assuming that all the water that the plant transpires through the canopy must first pass through the stem, then it is possible to infer transpiration from sap flow within the stem. These sap flow sensors have undergone significant development recently and, as a result, there are some methodological variants: thermal dissipation method, heat balance method and the heat ratio method (ICT, 2012).

The principle of these sap flow sensors is to apply a constant heat source in the raw sap stream or in its vicinity. The extent to which the temperature in the vicinity of this source is disrupted depends on the significance of the sap flow, and heat loss is directly proportional to this flow. This method provides a direct measurement of transpiration and presents a typical evolution throughout the day, reaching its maximum value at mid-day, when radiation is at a peak, and its minimum value during the night. An abnor-

directa de la transpiración y presenta una evolución típica a lo largo del día, alcanzando el valor máximo al medio día, cuando la radiación es máxima, y un mínimo durante la noche. Una evolución anormal durante el día, por ejemplo una caída en el flujo de savia cuando los valores de radiación son máximos, indica una situación de estrés hídrico.

Las ventajas de este método es que mide directamente la transpiración, en forma continua y en tiempo real. Entre los inconvenientes se encuentran el alto costo, la radiación solar y DPV influyen directamente en la tasa de transpiración, por tanto, para un buen uso de estos sensores es necesario contar con información de estos dos parámetros climáticos (ICT, 2012).

Los métodos micrometeorológicos están muy extendidos en cultivos anuales, sin embargo, encuentran múltiples problemas cuando se trata de cultivos *perenes* al no considerar la rugosidad ocasionada por el dosel de los árboles, que a menudo favorece la existencia de gradientes de evaporación muy marcados, y al no tomar en cuenta que los árboles y el suelo pierden agua de forma diferente: existe una diferencia muy notable entre zonas de fuerte evaporación, calor latente y de calor sensible, al llegar una parte importante de la radiación solar directamente al suelo (Valancogne y Granier, 1991).

Los métodos citados anteriormente, no están directamente relacionados con el funcionamiento hídrico de las plantas, acentuándose las diferencias entre el estado hídrico real y el estimado en situaciones de déficit hídrico. En este contexto, resulta conveniente estudiar la posibilidad de medir directamente el estado hídrico de las plantas, que integra todas las condiciones externas, utilizándolo como indicador mediante el empleo de sensores situados en las plantas o en su interior (Shackel *et al.*, 1992) que permitan la toma de datos de forma continua y automatizada. Los sensores utilizados deben ser a la vez confiables, tener una máxima precisión, fáciles de utilizar y económicos (Cohen, 1994).

Para mejorar la gestión del riego, los agricultores necesitan herramientas que les permitan cuantificar las necesidades hídricas de las plantas y, saber cuándo y cuánto regar. Con este objetivo, en los últimos años se han desarrollado diferentes métodos, algunos de ellos puestos en práctica para decidir el momento y la cantidad óptima del riego.

Los objetivos del presente trabajo fueron, determinar la transpiración horaria del cultivo de cacao mediante el medidor de flujo de savia y estimar los coeficientes de cultivo (Kc) en las diferentes etapas de desarrollo para determinar los requerimientos hídricos del cultivo en las condiciones de la Chontalpa, estado de Tabasco.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características del sitio experimental. El estudio se realizó en el Campo Experimental Huimanguillo ubicado en

mal evolution during the day, such as a drop in sap flow when radiation values are at a maximum, indicates a situation of water stress.

The advantage of this method is that it directly measures transpiration, continuously and in real time. The disadvantages include the high cost, and the fact that solar radiation and VPD directly influence the transpiration rate; therefore, in order to use these sensors properly, it is necessary to have information on these two climatic parameters (ICT, 2012).

Micrometeorological methods are widely used in annual crops; however, many problems arise when it comes to *perennial* crops because they do not consider the roughness caused by the tree canopy, which often favors the existence of very marked evaporation gradients, and because they do not take into account that trees and soil lose water differently: that is, there is a striking difference between areas of high evaporation, latent heat and sensible heat, due to a significant portion of the solar radiation directly reaching the ground (Valancogne and Granier, 1991).

The above methods are not directly related to plant water functioning, thereby accentuating the differences between actual and estimated water status in water deficit situations. In this context, it is appropriate to consider the possibility of directly measuring the water status in plants, which integrates all external conditions, using it as an indicator through the use of sensors placed on or in plants (Shackel *et al.*, 1992) that allow continuous and automated data collection. The sensors used must also be reliable, highly accurate, easy to use and economical (Cohen, 1994).

To improve irrigation management, farmers need tools that enable them to quantify plant water needs and to know when and how much to water. To this end, in recent years various methods have been developed and put into use to determine optimum irrigation time and amount.

The objectives of this study were to determine hourly transpiration in cacao using a sap flow meter and estimate crop coefficients (Kc) at different stages of development in order to determine crop water requirements in the conditions of the Chontalpa region, Tabasco State.

MATERIALS AND METHODS

Characteristics of the experimental site. The study was conducted at the Huimanguillo Experimental Field located in the Chontalpa region of Tabasco, located at 17° 51' 07" north latitude and 93° 23' 46" west longitude (Figure 1). The climate is warm and humid with abundant rainfall in the summer with temperature changes in the months of December and January. The average annual temperature is 26.2 °C, with the maximum monthly average being in May with 30.6 °C, while the absolute maximum and minimum reach 45 and 14 °C, respectively. The rainfall regime is characterized by 2,290.3

la región de la Chontalpa, Tabasco, localizado en la latitud norte 17° 51' 07" y longitud oeste 93° 23' 46" (Figura 1). El clima es cálido húmedo con abundantes lluvias en verano con cambios térmicos en los meses de diciembre y enero; su temperatura media anual es de 26.2 °C, siendo la máxima media mensual en mayo con 30.6 °C; a la vez, la máxima y mínima absoluta alcanzan los 45 y 14 °C, respectivamente. El régimen de precipitación pluvial se caracteriza por un total de 2,290.3 mm anuales, donde en el mes de septiembre se presenta el valor máximo y es nula en el mes de abril. La evapotranspiración potencial anual es de 1,452 mm. Las mayores velocidades medias de los vientos, se concentran en los meses de noviembre y diciembre con 30 km·h⁻¹, localizándose en el mes de mayo los mínimos, siendo del orden de los 18 km·h⁻¹.



FIGURA 1. Localización geográfica del sitio experimental, Campo Experimental Huimanguillo, Tabasco, México.

FIGURE 1. Geographic location of the Huimanguillo Experimental Field in Tabasco, Mexico.

Suelos. El tipo de suelo es un fluvisol eutríco, de textura franco, pH moderadamente alcalino (7.8), contenido bajo de materia orgánica (1.2 %), bajo de magnesio (2.5 me·100 g⁻¹), bajo de nitrógeno total (0.07) y medio en amonio (14.2 ppm), medio en fósforo (15.2 ppm) y deficientes en potasio (0.49 me·100 g⁻¹), alto en calcio intercambiable (10.04 me·100 g⁻¹) pero baja Capacidad de Intercambio Catiónico (13.5 me·100 g⁻¹). Con base en la textura del suelo en la profundidad de 30 cm, la densidad aparente (Da), capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) son de 1.45 g·cm³, 34 y 13 %, respectivamente. A la profundidad mayor de 30 cm, los valores de Da, CC y PMP son de 1.55 g·cm³, 35 y 16 %, respectivamente.

Genotipo. Se utilizó un árbol de cacao Híbrido INIFAP F-7 cruza UF613 de origen trinitario de Costa Rica X IMC67 de origen genético forastero de Perú. La plantación tiene una edad de 10 años y una superficie de dos hectáreas.

mm of total rainfall annually, with the maximum value in September and zero in April. The annual potential evapotranspiration is 1,452 mm. The highest average wind speeds are concentrated in the months of November and December with 30 km·h⁻¹, with the lowest speeds occurring in May, being on the order of 18 km·h⁻¹.

Soil. The soil type is a eutric fluvisol with loam texture and moderately alkaline pH (7.8). It is low in organic matter content (1.2 %), low in magnesium (2.5 me·100 g⁻¹), low in total nitrogen (0.07), medium in ammonium (14.2 ppm), medium in phosphorus (15.2 ppm), deficient in potassium (0.49 me·100 g⁻¹), and high in exchangeable calcium (10.04 me·100 g⁻¹) but with low cation exchange capacity (13.5 me·100 g⁻¹). Based on the soil texture at a depth of 30 cm, bulk density (BD), field capacity (FC) and permanent wilting point (PWP) are 1.45 g·cm³, 34 and 13 %, respectively. At a depth greater than 30 cm, the values of BD, FC and PWP are 1.55 g·cm³, 35 and 16 %, respectively.

Genotype. An INIFAP F-7 hybrid cacao tree (a cross between UF613 of Costa Rican trinitarian origin X IMC67 of foreign Peruvian genetic origin) was used. The plantation is 10 years old and covers two hectares.

Shading characteristics. The gliricidia (*Gliricidia sepium* Jacq.) is used as a shade tree. It is a species of the leguminous family, with very rapid growth and development of the leaf area. It reaches crown projection in a year (an area of 6 m²). The species grows on average 0.7 to 3.3 m in height per year, it is deciduous, it loses its leaves in the flowering season (February to April), and the leaves decompose quickly in soil. It quickly grows up to 9 m high. Its foliage allows plenty of light into the plantation (Vos et al., 2003).

Measuring transpiration. It was performed by the heat pulse method using a stand-alone and self-sustaining instrument for measuring sap flow (Figure 2). From the beginning of the Heat Ratio Method (HRM), the sap flow meter is able to measure high and low flow velocities in both small woody stems and very large trees. It is the only instrument that can measure zero flow and reverse velocity of sap flow. The programmed measurement interval was every 10 minutes.

Method operating principles and equipment description. This technique utilizes a heat probe, inserted into the stem of the plant, which injects a heat pulse for a short period (typically less than two seconds) into the plant's conductive tissue. This heat pulse can be used to estimate the rate of water movement through the use of temperature probes inserted asymmetrically into the trunk, one located 5 mm above and the other 10 mm below the heat probe. This spatial distribution of the monitoring probes compensates for the heat diffusion processes and allows the convection to be isolated and measured. For this reason, it is sometimes called the "compensation method." The determinations that the heat pulse uses as an indicator of sap flow are based on

Características del sombreado. Como árbol de sombra se utiliza el cocoite (*Gliricidia sepium* Jacq.), es una especie de la familia de las leguminosas, de muy rápido crecimiento y desarrollo de la superficie foliar, alcanza la proyección de copa en un año (una superficie de 6 m²). El crecimiento en altura muestra un incremento medio anual de 0.7 a 3.3 m, es caducifolio, los árboles pierden las hojas en la época de floración (febrero a abril), las hojas se descomponen en seguida en el suelo. Crece rápidamente hasta 9 m de altura. Su follaje permite la entrada abundante de luz en la plantación (Vos *et al.*, 2003).

Medición de la transpiración. Se realizó por el método de pulso de calor a través de un instrumento independiente y auto sostenible para la medición del flujo de savia (Figura 2) a partir del principio del Método del Cociente Calórico (HRM-Heat Ratio Method), el Medidor de Flujo de Savia es capaz de medir velocidades altas y bajas de flujo, tanto en tallos leñosos pequeños como en árboles muy grandes. Es el único instrumento que puede medir flujo cero y velocidad reversa del flujo de savia. El intervalo de medición programado fue cada 10 minutos.

Principios de funcionamiento del método y descripción del equipo. Esta técnica utiliza una sonda de calor, insertada en el tallo de la planta, que inyecta un pulso de calor por un corto periodo (normalmente menor de dos segundos) en el tejido conductor de la planta. Este pulso de calor puede ser utilizado para estimar la tasa de ascenso de agua mediante el uso de sondas de temperatura, insertadas de forma asimétrica en el tronco, una se ubica a 5 mm por arriba y la otra a 10 mm abajo de la sonda de calor. Esta distribución

heat conduction and convection in a homogeneous and isotropic medium. The analytical solution of the variation equation of the temperature at the time considers the densities of the green wood and sap, the specific heat of both, the thermal conductivity in the axial and tangential directions, the area of the xylem section occupied by sap flows and the amount of internal heat released by the heat probe. In this method, it is assumed that the temperature probes have no effect on the measurement of heat flow. To relate the velocity of the heat flow with the sap flow, the following equation is used:

$$J_s = (kFM + E) V \quad (1)$$

Where:

J_s = sap flow density, FM is the fraction occupied by wood, and FL is the fraction occupied by water. The factor $k = 0.441$ is related to the thermal properties of the wood matrix with respect to water.

To correctly install this equipment, a series of steps should be followed: i) determine the depth of the conductive tissue in order to install the needles in the xylem and not in the bark; ii) align the probes, before inserting them, coat them with fungicide, and change their location periodically due to the effect that the wounds made during the measurements may cause; iii) do not place them in the heartwood or dead wood; iv) they should be installed early in the day, with weak flow; v) prior to installation, test the heat probes in a dry stem (without sap flow) and eliminate tests that give results with a greater than 1.5 % difference from the average.

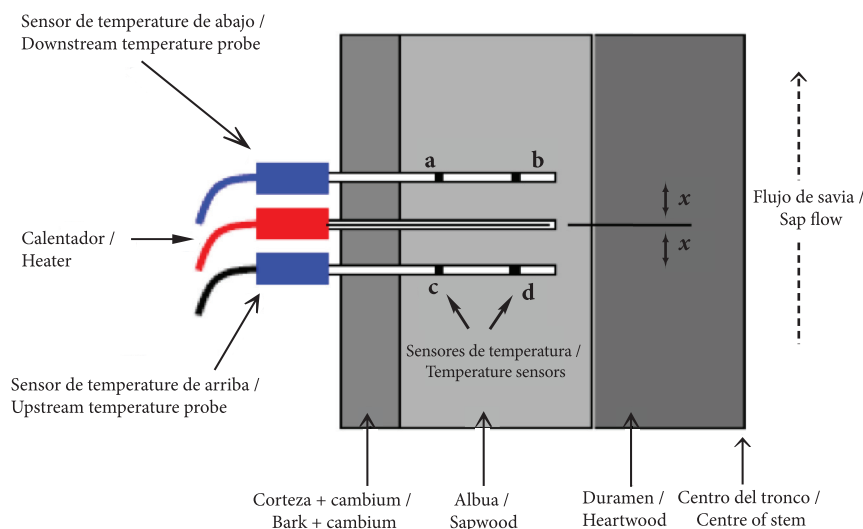


FIGURA 2. Variables de interés para la medición de flujo de savia en el tallo de un árbol (Cohen *et al.*, 1981).

FIGURE 2. Variables of interest for measuring sap flow in a tree stem (Cohen *et al.*, 1981).

espacial de las sondas de monitoreo compensa los procesos de difusión de calor y permite que la convección sea aislada y medida. Por esta razón, en ocasiones se le denomina “método de compensación”. Las determinaciones que utilizan el pulso de calor como indicador del flujo de savia se basan en la conducción y convección de calor en un medio homogéneo e isotrópico. La solución analítica de la ecuación de variación de la temperatura en el tiempo considera las densidades de la madera fresca y la savia, el calor específico de ambas, la conductividad térmica en las direcciones axial y tangencial, el área de la sección del xilema ocupada por flujos de savia y la cantidad de calor interno liberada por la sonda de calor. En este método, se asume que no hay efecto de las sondas de temperaturas en la medida de flujo de calor. Para relacionar la velocidad del flujo de calor con el flujo de savia, se utiliza la siguiente ecuación:

$$J_s = (kFM + E) V \quad (1)$$

Donde:

J_s = densidad del flujo de savia, FM es la fracción ocupada por madera, FL es la fracción ocupada por agua. El factor $k = 0.441$ está relacionado con las propiedades térmicas de la matriz de la madera con respecto al agua.

Para instalar correctamente este equipo se deben considerar una serie de pasos: i) determinar la profundidad del tejido de conducción para instalar las agujas en el xilema y no en la corteza, ii) alinear las sondas, antes de insertarlas, cubriéndolas con fungicida, cambiarlas de lugar periódicamente por el efecto que puedan causar las heridas provocadas en las mediciones; iii) no ubicarlas en el duramen o madera muerta; iv) se deben instalar a primera hora del día, con flujo débil; v) previo a la instalación, probar las sondas de calor en un tallo seco (sin flujo de savia) y eliminar las pruebas que dan resultados con diferencia mayor que 1.5 % del promedio.

Los datos se procesan manualmente utilizando una hoja de cálculo Excel creando archivos de valores separados por coma CSV proporcionados por el Medidor de Flujo de Savia. Se pueden importar los datos al Software Herramienta del Flujo de Savia (Sap Flow Tool Software), este proporciona en forma instantánea gráficos en 2D y 3D de la velocidad del pulso de calor así como el procesamiento de la velocidad y el flujo de la savia. Un paquete completo de datos puede ser instantáneamente procesado si los factores de corrección requieren ser modificados o si hay información adicional disponible (Cohen *et al.* 1981).

El método fue desarrollado en Australia por investigadores de la Universidad de Western Australia, ICRAF y CSIRO, permite medir flujos muy lentos, con flujo reverso de savia y el monitoreo continuo en tallos y raíces en un amplio rango de especies y condiciones ambientales. Este sistema se compone de dos sensores de temperatura que se insertan

Data are processed manually using an Excel spreadsheet by opening the comma separated values (CSV) file provided by the sap flow meter. The data file can be imported into the Sap Flow Tool Software, providing instant 2D and 3D graphing of the heat pulse velocity and processing of sap velocity and flow. The entire data set can be instantly processed if correction factors require modification or additional information becomes (Cohen *et al.* 1981).

The method was developed in Australia by researchers from the University of Western Australia, ICRAF and CSIRO. It allows measuring very slow flows and reverse sap flow through continuous monitoring in stems and roots in a wide range of species and environmental conditions. This system consists of two temperature sensors that are inserted radially into the stem xylem next to a heater (resistance) positioned equidistant from these sensors (Figure 3). It emits a heat pulse from one of the sensors towards the flow stream which is then detected by the second sensor. The time required for the increase in temperature to reach the second point is indicative of the speed with which the sap flows. To obtain the heat pulse speed, the following equation is used:

$$V_p = \frac{K}{X} \ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \quad (2)$$



FIGURA 3. Sistema de pulso de calor con sensores y calentador insertados en el tallo de una planta de cacao.

FIGURE 3. Heat pulse system with sensors and heater inserted into the stem of a cacao plant.

radialmente en el xilema del tallo junto a un calentador (resistencia) colocado a igual distancia de estos sensores (Figura 3). Se emite un pulso de calor de uno de los sensores hacia la corriente de flujo que luego es detectado por el segundo sensor. El tiempo que se requiere para que el incremento en la temperatura llegue al segundo punto es indicativo de la velocidad con que fluye la savia. Para obtener la velocidad del pulso de calor se utiliza la ecuación:

$$V_p = \frac{K}{X} \ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \quad (2)$$

Donde:

K es la difusividad térmica del xilema, X es la distancia entre el calentador y cada uno de los sensores (generalmente de 6 mm), ΔT_1 y ΔT_2 son los incrementos de temperatura en los sensores ubicados corriente abajo y corriente arriba con respecto a la sonda de calor, respectivamente. Scholz *et al.* (2002) y Burgess *et al.* (2000) describen las correcciones y cálculos para obtener el valor de K y así obtener las velocidades de flujo.

Originalmente los sistemas de pulso de calor fueron desarrollados para medir flujo en tallos, pero actualmente también se han utilizado para estimar el flujo de agua de las raíces (Scholz *et al.* 2002; Scholz *et al.*, 2004). Una revisión más detallada sobre los sistemas de pulsos de calor puede ser encontrada en Burgess *et al.* (2000).

Descripción del método del cociente calórico. El Método del Cociente Calórico es una mejora del Método de Compensación del Pulso de Calor (CHPM- Compensation Heat Pulse Method). Es una técnica modificada del pulso de calor donde el consumo de energía es muy bajo, aproximadamente de 70 m Amp por día, con intervalo de muestreo de cada 10 minutos, bajas tasas promedio de transpiración que permite medir velocidades bajas y reversa de flujo de savia en plantas leñosas (Burgess *et al.*, 2000).

Las agujas del HRM tienen dos puntos de medición radial para la caracterización de los gradientes de flujo radial proporcionando así mediciones más exactas. A través de un microprocesador de control, el punto de medición interior puede ser activado o desactivado, dependiendo de la anatomía específica de la madera de la especie medida. Esto proporciona una gran flexibilidad en el rango del diámetro del tronco, permitiendo mediciones de diámetro mayor que 10 mm en tallos leñosos o raíces hasta árboles más grandes. Esto permite que los flujos de agua sean monitoreados en troncos y raíces de un amplio rango de especies, tamaños y condiciones ambientales, se incluyen condiciones de sequía y estrés hídrico.

Diseño. Las sondas del HRM consisten de tres agujas de 35 mm de longitud conectadas integralmente a un procesador de 16-bits. Las sondas superior e inferior, contienen dos jue-

Where:

K is the thermal diffusivity of the xylem, X is the distance between the heater and each of the sensors (usually 6 mm), ΔT_1 and ΔT_2 are the temperature increases in the sensors located downstream and upstream from the heat probe, respectively. Scholz *et al.* (2002) and Burgess *et al.* (2000) describe the corrections and calculations to obtain the value of K and thus the flow velocities.

Heat pulse systems were originally developed to measure flow in stems, but they are also currently used to estimate water flow in roots (Scholz *et al.* 2002; Scholz *et al.*, 2004). A more detailed review of heat pulse systems can be found in Burgess *et al.* (2000).

Description of the heat ratio method. The heat ratio method is an improvement over the Compensation Heat Pulse Method (CHPM). It is a modified heat pulse technique in which power consumption is very low, approximately 70 m Amp per day, at a 10-minute sampling interval under average transpiration rates that allow measuring low and reverse sap flow rates in woody plants (Burgess *et al.*, 2000).

The HRM needles have two radial measurement points for characterizing radial sap flow gradients, making measurements more accurate. Through microprocessor control, the inner measurement point can be activated or deactivated depending on the specific anatomy of the wood species being measured. This provides great flexibility in terms of stem diameter range, allowing measurements of diameters greater than 10 mm in woody stems or roots of even very large trees. This enables monitoring water flows in stems and roots of a wide range of species, sizes and environmental conditions, including drought and water stress.

Design. The HRM probes consist of three 35-mm-long needles integrally connected to a 16-bit processor. The top and bottom probes contain two sets of matched and calibrated high-precision thermistors, located at 7.5 mm and 22.5 mm from the tip of each probe. The third and centrally-located needle is a line heater that runs through the xylem and delivers a uniform and exact heat pulse through the stem.

Determination of crop water needs

The calculation of crop water requirements depends on the measurement of water balance components in the experimental plot, which is expressed as the change in soil moisture content (ΔH).

$$\Delta H = P_{ef} + R - ET_c - Per \quad (3)$$

Where:

P_{ef} is effective precipitation, R is irrigation depth, ET_c is crop evapotranspiration and Per is water infiltration to lower lev-

gos acoplados y calibrados de termistores de alta precisión, localizados a 7.5 mm y 22.5 mm de la punta de cada sonda. La tercera aguja central es la línea del calentador que atraviesa el xilema, la cual envía en forma uniforme y exacta el pulso de calor a través del tallo.

Determinación de las necesidades hídricas del cultivo

El cálculo de los requerimientos hídricos del cultivo depende de la medición de los componentes del balance hidrológico en la parcela experimental, el cual se expresa como la variación del contenido de humedad del suelo (ΔH).

$$\Delta H = P_{ef} + R - ET_c - Per \quad (3)$$

Donde:

P_{ef} es la precipitación efectiva, R es la lámina de riego, ET_c es la evapotranspiración del cultivo y Per es la infiltración del agua hacia niveles inferiores, en este caso, se asumió igual a 0 debido a que el agua se aplicó en dosis pequeñas con alta frecuencia.

Precipitación efectiva (P_{ef})

Es la parte de la lluvia anual o estacional total que es útil directa o indirectamente para la producción del cultivo en el lugar donde se registra (Molua y Lambi, 2006). Se calculó con el criterio del Servicio de Conservación de Suelos de los EE.UU. (USDA) y este método se rige por las siguientes condiciones de precipitación (P):

si $P \leq 75$ mm,

$$P_{ef} = (0.6P - 10) \quad (4)$$

Donde:

P_{ef} es la precipitación efectiva (mm).

o si $P > 75$ mm, $P_{ef} = (0.8P - 25)$ (5)

Evapotranspiración del cultivo (ET_c)

La evapotranspiración de un cultivo es un proceso simultáneo a través del cual un área de cultivo pierde agua por evaporación del suelo y transpiración del follaje. El cálculo se realizó mediante el método del coeficiente único de cultivo (K_c), donde se integran los efectos combinados de la transpiración y evaporación del suelo y con la relación:

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (6)$$

Donde:

ET_0 es la evapotranspiración de referencia (mm).

Evapotranspiración de referencia (ET_0)

La ET_0 es la tasa de evapotranspiración de una superficie

els; in this case, it was assumed to be equal to zero since the water was applied in small doses with high frequency.

Effective precipitation (P_{ef})

It is the part of total annual or seasonal rainfall that is directly or indirectly useful for crop production in the place where it is recorded (Lambi and Molua, 2006). It was calculated with the criterion of the U.S. Soil Conservation Service (USDA) and this method is governed by the following precipitation conditions (P):

if $P \leq 75$ mm,

$$P_{ef} = (0.6P - 10) \quad (4)$$

Where:

P_{ef} is effective precipitation (mm).

or if $P > 75$ mm, $P_{ef} = (0.8P - 25)$ (5)

Crop evapotranspiration (ET_c)

Crop evapotranspiration is a simultaneous process by which a crop area loses water by soil evaporation and foliage transpiration. The calculation was performed using the single crop coefficient (K_c) method, where the combined effects of transpiration and soil evaporation are integrated, and with the relationship:

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (6)$$

Where:

ET_0 is reference evapotranspiration (mm).

Reference evapotranspiration (ET_0)

The ET_0 is the evapotranspiration rate of a reference surface that occurs without water restrictions (Allen et al., 2006). The calculation of this variable was made with the type A tank method by multiplying the average monthly evapotranspiration (E_v) by the K_p tank coefficient (0.80), recommended for tropical regions where high relative humidity and low wind speed prevail (Doorenbos and Pruitt, 1984; Allen et al., 2006):

$$ET_0 = K_p * E_v \quad (7)$$

Crop coefficients (K_c)

To obtain the crop coefficient values, we used equation (6) where once the transpiration and evaporation are known, the ET_0 and ET_c were obtained for the measurement period. To calculate the irrigation depth applied in the cacao trees, the K_c were taken from the database of FAO Bulletin 56 (Allen et al., 2006); this value was 1.05.

de referencia que ocurre sin restricciones de agua (Allen *et al.*, 2006). El cálculo de esta variable se realizó con el método del tanque tipo A al multiplicar el promedio mensual de evaporación (E_v) por el coeficiente de tanque K_p (0.80), recomendado para regiones tropicales donde prevalece alta humedad relativa y baja velocidad del viento (Doorenbos y Pruitt, 1984; Allen *et al.*, 2006):

$$ET_0 = K_p * E_v \quad (7)$$

Coeficientes de cultivo (K_c)

Para obtener los valores de coeficientes de cultivo, se utilizó la ecuación (6) donde una vez conocida la transpiración y evaporación se obtuvo la ET_0 y la ET_c para el periodo de medición. Para el cálculo de la lámina de riego aplicada en los árboles de cacao, los K_c fueron tomados de la base de datos del boletín 56 de la FAO (Allen *et al.*, 2006), este valor fue de 1.05.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Clima

En la Figura 4 se presenta el comportamiento del clima de la estación tradicional del Campo Experimental Huimanguillo durante el periodo experimental, puede observarse (del 16 de febrero al 31 de julio de 2012) la variación de la precipitación y las temperaturas mínimas y máximas. El clima está relacionada con la fenología del cultivo, durante este periodo, la cantidad de lluvia fue 635.5 mm, con temperaturas máximas y mínimas de 33.1 y 22.9 °C, respectivamente.

Transpiración

En la Figura 5 se compara la evolución de la transpiración durante un día despejado y un día nublado, se observa que en un día sin nubosidad el comportamiento de la transpiración depende de la temperatura y radiación global durante el día, mientras que un día nublado, la transpiración es escasa, debido a que ésta depende principalmente de la radiación global (López *et al.*, 2012).

El comportamiento de la transpiración durante el día, se debe a la capacidad de los estomas para abrirse y cerrarse regulando con esto la conductancia a los gases y con ello su intercambio. Generalmente, los estomas se abren con la luz al amanecer y se cierran con la oscuridad. Una planta típica en un día normal alcanza su máxima apertura estomática durante las horas de la mañana y hacia medio día (Figura 5); sin embargo, hay plantas que producen una reducción de su conductividad al medio día, cuando se presentan los mayores valores de Déficit de Presión de Vapor. Por otra parte, las plantas en suelos con un bajo potencial hídrico también suelen abrir sus estomas sólo durante las primeras horas del día (Squeo y León, 2007).

En la Figura 6, se presenta la transpiración de cinco días continuos con cielo despejado, observándose una similitud del

RESULTS AND DISCUSSION

Climate

Figure 4 shows the behavior of the weather recorded at the Huimanguillo Experimental Field during the experimental period, which was from February 16 to July 31, 2012. Variation in precipitation and maximum and minimum temperatures can be seen during this period. The climate is related to crop phenology; during this period, the amount of rainfall was 635.5 mm, with maximum and minimum temperatures of 33.1 and 22.9 °C, respectively.

Transpiration

Figure 5 compares the evolution of transpiration during a clear day and a cloudy day. It can be seen that on a day without clouds, transpiration behavior depends on the temperature and global radiation during the day, while on a cloudy day transpiration is limited, because it largely depends on global radiation (López *et al.*, 2012).

Transpiration behavior during the day is due to the ability of the stomata to open and close, thereby regulating conductance to gases and thus their exchange. Generally, the stomata open with the light at dawn and close with darkness. A typical plant on a normal day reaches its maximum stomatal opening during the morning and close to mid-day (Figure 5), but there are plants that present a reduction in their conductivity at mid-day, when the highest values of Vapor Pressure Deficit occur. On the other hand, plants in soils with low water potential also usually open their stomata only during the first hours of the day (Squeo and León, 2007).

Figure 6 presents the transpiration on five continuous days with clear sky, showing similar transpiration behavior on those days. Accumulated transpiration during the day is about 45 liters per tree. In view of the different canopy and foliage shapes, and especially the pruning of shade trees, there is a similarity in the evapotranspiration rates of cacao and shade trees. In this regard, Imbach *et al.* (1989) suggest that the K_c values derived in their study are applicable to a wide range of cacao systems with different shade species.

In cacao systems with deciduous shade trees, annual evapotranspiration is the result of adding the evapotranspiration values of the cacao plants, from 800 to 1,200 mm per year, with those of the shade trees, from 700 to 1,050 mm per year, resulting in a total of 1,500 to 2,250 mm per year, equivalent to 4.1 to 6.2 mm per day (Doorenbos and Pruitt, 1984). Imbach *et al.* (1989) used a hydrological model to estimate the transpiration for two cacao production systems using different shade species and found no significant difference in rainfall interception; therefore, there were no differences in overall water use efficiency within the water balance. Moreover, they did not observe notable differences in evapotrans-

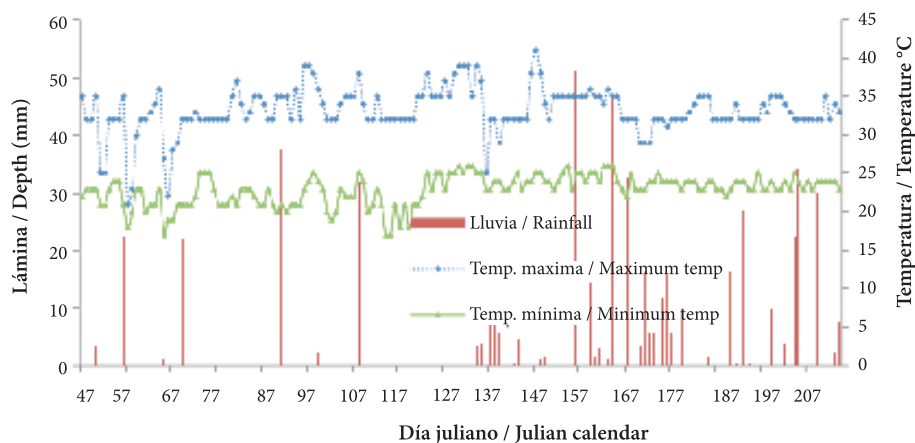


FIGURA 4. Comportamiento de temperatura y precipitación en el Campo Experimental Huimanguillo, durante el periodo de medición del experimento.

FIGURE 4. Temperature and precipitation behavior in the Huimanguillo Experimental Field during the measurement period of the experiment.

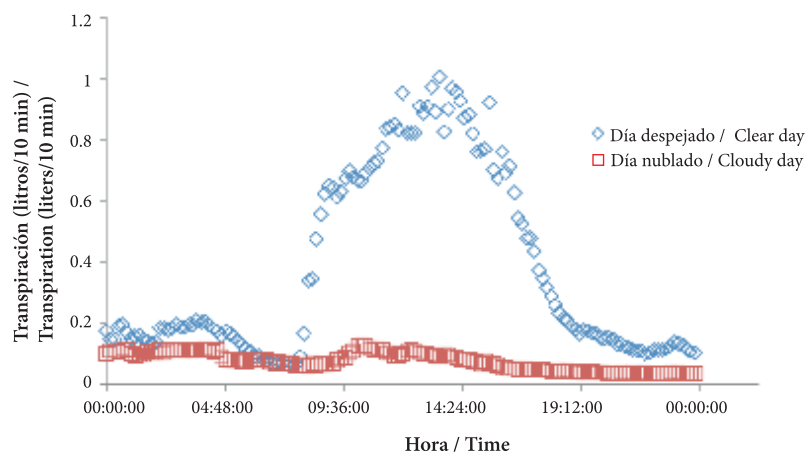


FIGURA 5. Traspiración del cultivo de cacao en un día despejado (24 de febrero/12) y un día nublado (25 de febrero/12).

FIGURE 5. Cacao crop transpiration on a clear day (February 24, 2012) and a cloudy day (February 25, 2012).

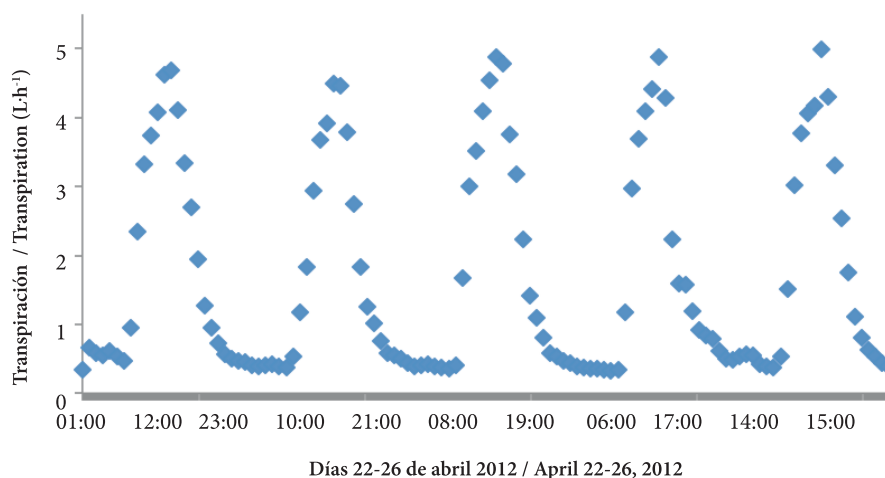


FIGURA 6. Transpiración del cultivo de cacao en días despejados del 22 al 26 de abril de 2012.

FIGURE 6. Cacao crop transpiration on five clear days, from April 22-26, 2012.

comportamiento de la transpiración durante el día. La transpiración acumulada durante el día es de alrededor de 45 litros por árbol. En vista de las distintas formas del dosel y el follaje, y la aplicación especialmente de las podas en los árboles de sombra, existe una similitud de tasas de evapotranspiración de los árboles de cacao y los árboles de sombra. Al respecto Imbach *et al.*, (1989) sugieren que los valores de Kc derivados en su estudio son aplicables a una amplia gama de los sistemas de cacao con diferentes especies de sombra.

En los sistemas de cacao con sombra de árboles caducifolios, la evapotranspiración anual es el resultado de sumar los valores de evapotranspiración de las plantas de cacao de 800 a 1,200 mm por año, los árboles de sombra de 700 a 1,050 mm por año, con un total de 1,500 a 2,250 mm por año, equivalente a 4.1 a 6.2 mm por día (Doorenbos y Pruitt, 1984). Imbach *et al.*, (1989) utilizaron un modelo hidrológico para estimar la transpiración para dos sistemas de producción de cacao utilizando diferentes especies de sombreado y no encontraron diferencia significativa en la intercepción de lluvia, por consiguiente, no hubo diferencias en el uso eficiente global del agua dentro del balance hídrico. Tampoco observaron diferencias notables en la evapotranspiración en el periodo de observación de 1 a 4

piration in the 4-year observation period, concluding that evapotranspiration consumes 50.0 and 51.3 % of rainfall in cacao systems with *E. poeppigiana* and *C. alliodora*, respectively. Evapotranspiration of these systems was 2.7 and 2.8 mm per day, respectively.

Regarding the potential yield of cacao beans under different shading conditions, Zuidema *et al.* (2005) used the Simple and Universal Crop Growth Simulator (SUCROS) model. They showed that moderate shade levels hardly affected bean yield, while shading greater than 60 % reduced yields by more than one-third.

Irrigation requirements (IR).

Reference evapotranspiration is linked to local factors and its annual fluctuation presents a rapid increase in the month of May, when it reaches its maximum value, and then a gradual decline. Table 1 shows monthly irrigation requirements (IR) estimated from climatic water balance (evaporation and effective precipitation) and estimated Kc values for cacao. It can be seen that in the months of February, March, April and May, daily irrigation applications varying from 1.45 to 3.4 mm in depth are required.

CUADRO 1. Requerimientos hídricos del cultivo de cacao en los meses de estudio a partir de la transpiración del cultivo y evapotranspiración de referencia de tanque tipo "A".

TABLE 1. Cacao water requirements in the study months based on crop transpiration and type "A" tank reference evapotranspiration.

Mes / Mo	Prec Tot / Tot Prec	Prec Efect / Effect Prec	ET ₀	Kc	ET _c	RR / IR	RR / IR
	mm/mes mm/mo	mm/mes mm/mo	mm/mes mm/mo		mm/mes mm/mo	mm/mes mm/mo	mm/día mm/day
Feb	70.00	36.00	130.05	0.60	78.03	42.03	1.45
Mar	60.50	30.30	163.25	0.60	97.95	67.65	2.18
Abr / Apr	34.50	14.70	168.24	0.65	109.35	94.65	3.16
May	49.50	23.70	184.56	0.70	129.19	105.49	3.40
Jun / June	276.50	201.20	157.81	0.70	110.46	0.00	0.00
Jul / July	179.50	123.60	162.52	0.70	113.76	0.00	0.00

años, concluyendo que la evapotranspiración consume el 50.0 y el 51.3 % de la precipitación al introducir sistemas de cacao con *E. poeppigiana* o *C. alliodora*, respectivamente. La evapotranspiración de estos sistemas fue de 2.7 y 2.8 mm por día, respectivamente.

Respecto del rendimiento potencial de granos del cultivo de cacao en diferentes condiciones de sombreado, Zuidema *et al.* (2005) utilizaron el modelo Simple y Universal para la Simulación de Crecimiento de Cultivos (SUCROS, por sus siglas en inglés), mostraron que con niveles moderados de sombreado apenas afectaron el rendimiento de granos de cacao mientras que un sombreado mayor que el 60 % disminuyeron los rendimientos en una tercera parte.

Kc values estimated with shade trees during their growth and development vary from 0.6 to 0.7 during the measurement period from February to May, months when irrigation is required.

CONCLUSIONS

Transpiration in cacao varies from 10 to 40 liters per day, in a 10-year-old tree during the irrigation requirement period. The crop coefficient (Kc) values estimated with shade trees during their growth and development vary from 0.6 to 0.7 in the months of February to May, when irrigation is required due to the water deficit that occurs according to the crop water balance.

End of English Version

Requerimientos de riego (RR).

La evapotranspiración de referencia está ligada a factores locales y su fluctuación anual presenta un aumento rápido en el mes de mayo en el que alcanza su valor máximo y después un descenso gradual. En el Cuadro 1 se presentan los requerimientos de riego (RR) a nivel mensual estimados a partir del balance hidrológico del clima (evaporación y precipitación efectiva) y valores estimados de Kc para el cultivo de cacao. Se puede notar que en los meses de febrero, marzo, abril y mayo requiere de aplicaciones de laminas diarias de riego que pueden variar de 1.45 a 3.4 mm.

Los valores de Kc estimados con árboles de sombra durante su crecimiento y desarrollo varían de 0.6 a 0.7 durante la etapa de medición en los meses de febrero a mayo, meses en que se requiere el riego.

CONCLUSIONES

La transpiración en el cultivo de cacao varía de 10 a 40 litros por día, en un árbol de 10 años de edad durante el periodo de requerimientos de riego. Los valores de coeficientes de cultivo Kc estimados con árboles de sombra durante su crecimiento y desarrollo varían de 0.6 a 0.7 en los meses de febrero a mayo, donde se requiere el riego debido al déficit hídrico que se presenta de acuerdo con el balance hidrológico del cultivo.

LITERATURA CITADA

- ALLEN, G. R.; PEREIRA, S. L.; RAES, D.; SMITH, M. 1998. Crop Evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage Paper Núm. 56. FAO, Rome, Italy. 300 p
- ALLEN, R., PEREIRA, D. Y SMITH, M. 2006. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Núm. 56. Roma: FAO, 298 p
- BURGESS, S. S. O.; ADAMS, M. A.; BLEDBY, T. M. 2000. Measurement of sap flow in roots of woody plants: a commentary. *Tree Physiology* 20: 909-913
- BURMAN, R.; POCHOV, L. O. 1994. Evaporation, evapotranspiration and climatic data. *Developments in Atmospheric Science*, 22. U.S.A. Elsevier Science B.V. 278 p
- COHEN, Y.; FUCHS, M.; GREEN, G. C. 1981. Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees. *Plant, Cell and Environment* 4, 391-397.
- COHEN, M. 1994. Funcionamiento hídrico y producción frutal del nogal en zonas semiáridas: Aplicación al manejo del riego. PhD, Universidad de Lleida (298 p.)
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. 1984. Guidelines for predicting crop water requirements. Ed. rev. Roma. FAO. 144p. (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24).
- JENSEN, M. E.; WRIGHT, J. L. 1978. The role of evapotranspiration models in irrigation scheduling. *Trans. ASAE*. 21: 82-87.
- ICT International. 2012. Medidor de flujo de savia SFM1. Soluciones para el monitoreo del suelo, planta y medio ambiente. Recuperado el 14 de abril de 2012. www.ictinternational.com
- IMBACH, C. A.; FASSBENDER, W. H.; BOREL, R.; BEER, J.; BONNEMANN, A. 1989. Modelling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) and cacao with poro (*Erythrina poeppigiana*) in Costa Rica. *Agroforestry Systems* 8: 267-287.
- LÓPEZ, L. R.; OJEDA, B. W.; LÓPEZ A., P. A. 2012. Método de flujo de savia para medir la transpiración en cacao (*Theobroma cacao* L.). In Memoria: VII Reunión Nacional de Innovación Agrícola, del 10 al 13 de Septiembre de 2012. Querétaro, Qro. p:34
- MOLUA, E.; LAMBI, C. 2006. Assessing the impact of climate on crop water use and crop water productivity: The CROPWAT analysis of three districts in Cameroon. CEEPA discussion paper Núm. 33, CEEPA, University of Pretoria. 44 p.
- SCHOLZ, F. G.; BUCCI, S. J.; GOLDSTEIN, G.; MEINZER, F. C.; FRANCO A. C. 2002. Hydraulic redistribution of soil water by neotropical savanna trees. *Tree Physiology* 22: 603-712.
- SCHOLZ, F. G.; BUCCI, S. J.; GOLDSTEIN, G.; MOREIRA, M.; STERNBERG, L.; MEINZER, F. C. 2004. Redistribución hidráulica de agua del suelo por árboles de sabanas neotropicales. En Cabrera, H. M. (ed) Fisiología ecológica en plantas, mecanismos y repuestas a estrés en los ecosistemas. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile. 207-220
- SHACKEL, K. A.; JOHNSON, R. S.; MEDAWAR, C. K. 1992. Substantial Errors in Estimates of Sap Flow Using the Heat Balance Technique on Woody Stems under Field Conditions. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 117(2): 351-356.
- SQUEO, A. F.; LEÓN F. M. 2007. Transpiración. Fisiología Vegetal. Universidad de La Serena, La Serena, Chile 3: 67-84.
- VALANCOGNE, C.; GRANIER, A. 1991. Intérêt des méthodes thermiques de mesure du flux de sève par l'étude du bilan hydrique des savanes Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone. *Proceedings of the Niamey Workshop, IAHS*. Publ. Núm. 199.
- VOS, J.; RITCHIE, G. M.; FLOOD J., J. B. 2003. Discovery Learning About Cocoa. *An inspirational guide for training facilitators*. CABI Bioscience/FAO 112 p.
- ZUIDEMA A. P.; LEFFELAAR A. P.; GUERRITSMA W.; MOMMER L.; ANTEN P. R., N. 2005. A physiological production model for cocoa (*Theobroma cacao*): model presentation, validation and application. *Agricultural Systems* 84: 195-225.