

Procedimiento para estimar rendimientos potenciales de café tipo arábica (*Coffea arabica* L.) a partir de la temperatura diurna

Procedure to estimate arabica coffee (*Coffea arabica* L.) potential yields using diurnal temperature

DOI: 10.34188/bjaerv5n3-052

Recebimento dos originais: 06/05/2022

Aceitação para publicação: 30/06/2022

Lorenzo Armando Aceves-Navarro

Ph. D. University of Nebraska – Lincoln, U. S. A.
Profesor Investigador del Colegio de Postgraduados – Campus Tabasco
Apartado Postal 24, H. Cárdenas, 86500, Tabasco, México
Correo electrónico: laceves@colpos.mx

Benigno Rivera-Hernández

Doctor en Ciencias en Agricultura Tropical Sustentable por el Tecnológico Nacional de México.
Institución: Universidad Popular de la Chontalpa.
Dirección: Carretera Cárdenas-Huimanguillo Km 2. S/N, Ranchería, Paso y Playa, Heroica
Cárdenas, Tabasco
Correo electrónico: benigno.rivera@upch.mx

Agrícola Arrieta-Rivera

Maestría en Ciencias en Fruticultura/Colegio de Postgraduados - Campus Montecillo
Profesora Investigadora del Tecnológico Nacional de México/IT Zona Olmeca
Prol. Ignacio Zaragoza S/N, Villa Ocuilzapatlán, Centro, Tabasco, México
Correo electrónico: Agria_39@yahoo.com.mx

RESUMEN

En el presente estudio se propone un nuevo procedimiento para calcular el rendimiento potencial del cultivo de café (*Coffea arabica* L.) con base en la temperatura diurna. Este procedimiento solo es aplicable en aquellas áreas que previamente han sido clasificadas por suelo y clima, como muy aptas para ese cultivo en particular. El procedimiento se describe a detalle y se ejemplifica en el área de influencia de la estación climatológica de Dos Patrias, Tacotalpa, Tabasco, México, que es un área productora de café a la que previamente se le determinó el rendimiento potencial del café tipo arábica por el método de Zonificación Agro-Ecológica (ZAE) propuesto por la FAO. El resultado del método propuesto, se comparó con el obtenido previamente por el método de la FAO y ambos métodos estiman el rendimiento potencial del café tipo arábica, con menos del 3 % de diferencia.

Palabras clave: Zonificación Agro-Ecológica Global, tasa fotosintética máxima, biomasa neta total.

RESUMO

No presente estudo, propõe-se um novo procedimento para calcular a produtividade potencial da cultura do café (*Coffea arabica* L.) com base na temperatura diurna. Este procedimento só é aplicável naquelas áreas que foram previamente classificadas por solo e clima, como muito adequadas para aquela cultura em particular. O procedimento é descrito em detalhes e é exemplificado na área de influência da estação climatológica de Dos Patrias, Tacotalpa, Tabasco,

México, que é uma área produtora de café na qual o rendimento potencial de café do tipo arábica foi previamente determinado pelo método de Zoneamento Agroecológico (ZAE) proposto pela FAO. O resultado do método proposto foi comparado com o obtido anteriormente pelo método da FAO e ambos os métodos estimam a produtividade potencial do café tipo arábica, com diferença inferior a 3%.

Palavras-chave: Zoneamento Agroecológico Global, taxa fotossintética máxima, biomassa líquida total.

1 INTRODUCCIÓN

El rendimiento potencial de un cultivo es aquel rendimiento máximo posible que no tiene ninguna restricción, salvo la impuesta por la genética del mismo cultivo y las condiciones climáticas (LOVENSTEIN et al., 1995). La FAO (1981) propone un procedimiento para estimar el rendimiento potencial, sin embargo, el uso del procedimiento es limitado en localidades donde no se cuenta con datos de irradiación solar global. Recientemente la IIASA/FAO reporta datos de biomasa y parámetros de rendimiento, así como las tasas fotosintéticas máximas de diferentes cultivos en función de la temperatura diurna (FISCHER et al., 2012).

Estos datos reportados por FISCHER et al. (2012), se pueden utilizar para desarrollar un nuevo procedimiento para estimar los rendimientos potenciales de un cultivo utilizando datos fácilmente accesibles como lo es la temperatura. Para ejemplificar el procedimiento se utilizó el cultivo de café tipo arábica, en una localidad cafetalera representativa del estado de Tabasco, mismo que se detalla en el presente estudio. Según ACEVES et al. (2011), los rendimientos potenciales del cultivo de café arábica (*Coffea arabica* L.) en una zona edafoclimáticamente muy apta va a depender principalmente del tipo y clon utilizado de café, del número de plantas por hectárea (densidad) y del manejo del sombreado.

Por otro lado, LOVENSTEIN et al. (1995) mencionan que las características del cultivo y las condiciones climáticas son los factores que determinan el potencial productivo de un cultivo. Este potencial se verá disminuido si se tienen restricciones dadas por los factores limitativos, como son los nutrientes del suelo y el abastecimiento de agua para el cultivo. Cuando además no se toman medidas para proteger el rendimiento, se incrementan las restricciones y se obtiene el rendimiento actual, que queda determinado por los factores reductores.

Dada la incertidumbre actual sobre los efectos que el cambio climático tendrá en lugares específicos, es necesario entonces conocer los rendimientos potenciales actuales y futuros. El conocimiento del rendimiento potencial permite a los productores, gobiernos e inversionistas hacer análisis financieros que garanticen la seguridad del retorno de la inversión. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo fue desarrollar un procedimiento que permita estimar los rendimientos

potenciales de un cultivo de café para una localidad específica, que previamente ha sido clasificada como muy apta para ese cultivo a partir de datos promedio diario mensuales y anuales de temperatura diurna y determinar si da resultados similares a los obtenidos por el método de Zonificación Agroecológica de la FAO.

2 MÉTODOLÓGÍA

Información climatológica

Datos diarios de temperatura máxima (T_{max}) y temperatura mínima (T_{min}) se extrajeron de los registros reportados en el programa ERIC III v2.0 desarrollado por el IMTA (2009). En esa Base de Datos se reportan registros diarios de temperatura, procedentes de 93 estaciones climatológicas localizadas en el estado de Tabasco. De esta base, se seleccionó para ejemplificar el procedimiento la estación climatológica de Dos Patrias, Tacotalpa, con 45 años de registro (1962-2006). Se seleccionó Tabasco, pues previamente se había realizado una determinación del rendimiento potencial del café utilizando el procedimiento de la FAO por ACEVES et al. (2011), misma que serviría como patrón de comparación.

Manejo operativo de los datos climatológicos

Como los datos diarios, promedio mensuales y anuales reportados de T_{max} y T_{min} por el IMTA (2009) están en formato de texto, se transcribieron a hojas de cálculo de Excel para su manejo operativo. A partir del registro de esos datos, se obtuvo el promedio diario de cada mes y de cada año, para cada uno de los 45 años de registro. Esta base de datos de T_{max} y T_{min} mensual y anual se utilizó para realizar los cálculos de la temperatura diurna y con ella estimar el rendimiento potencial de cada mes y el anual. En la Tabla 1 se muestran los valores promedio mensuales de los valores requeridos de entrada para estimar la temperatura diurna, necesario para calcular la biomasa neta total del cultivo de café tipo arábica.

Tabla 1. Valores promedio diario mensual y anual de la duración teórica del día (DL), temperatura máxima (T_{max}) y mínima (T_{min}) del área de influencia de la estación climatológica de Dos Patrias, Tacotalpa, Tabasco, México; requeridos para calcular la temperatura diurna.

MES	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
DL (horas)	11.1	11.4	11.9	12.4	12.8	13.0	13.0	12.6	12.1	11.6	11.2	11.0	12.0
T_{max} (°C)	26.7	28.1	30.6	33	34.3	33.4	32.7	32.7	31.8	30.2	28.6	27.4	30.8
T_{min} (°C)	17.4	17.9	19.5	21.4	22.5	22.5	21.9	21.8	21.9	20.9	19.4	18.1	20.4

Relación entre la temperatura diurna y la tasa fotosintética máxima

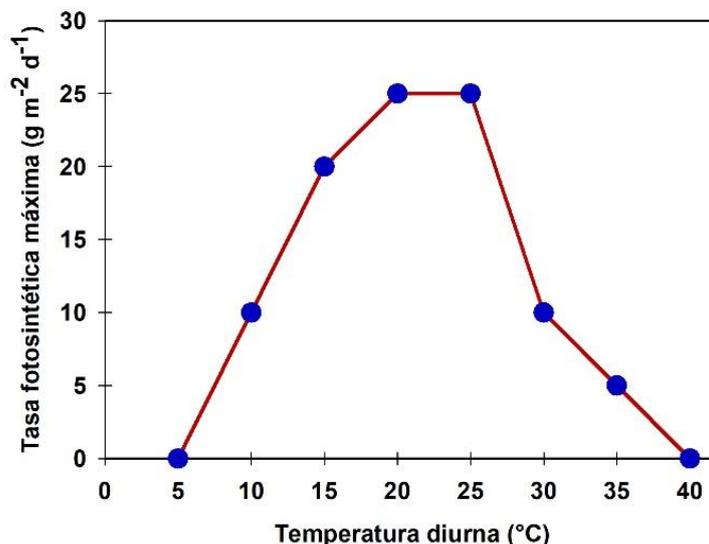
La relación existente entre la temperatura diurna (T_{diu}) y la tasa fotosintética máxima (TFM) para el cultivo de café tipo arábica reportada por FISCHER et al. (2012) se muestra en la Tabla 2, y de manera gráfica en la Figura 1.

Tabla 2. Valores de la tasa fotosintética máxima ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$) del café tipo arábica para diferentes temperaturas diurnas (FISCHER et al., 2012).

Café arábica	Temperaturas diurnas ($^{\circ}\text{C}$)										
	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Tasa fotosintética máxima	0	0	0	10	20	25	25	10	5	0	0

En la Figura 1, se observa que la TFM presenta los valores más altos en el intervalo de T_{diu} entre 20°C y 25°C . Asimismo, para valores de $T_{diu} \leq 20^{\circ}\text{C}$ o $T_{diu} \geq 25^{\circ}\text{C}$ la TFM decrece a menos de $25 \text{ g m}^{-2} \text{d}^{-1}$, tomando valores de cero a 5°C y 40°C respectivamente.

Figura 1. Relación entre la temperatura diurna y la tasa fotosintética máxima del café tipo arábica. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Tabla 1.



Cálculo de la temperatura diurna (T_{diu})

La T_{diu} se calcula a partir de datos de la duración teórica máxima del día en horas (DL), T_{max} , y T_{min} . Para ello se utiliza la ecuación (1) reportada por (FISCHER et al., 2012).

$$T_{diu} = T_m + \left(\frac{T_{max} - T_{min}}{4\pi} \right) * \left(\frac{11 - T_0}{12 + T_0} \right) * \text{seno} \left[\pi * \left(\frac{11 - T_0}{11 + T_0} \right) \right] \quad (1)$$

Donde: T_{diu} es la temperatura diurna ($^{\circ}\text{C}$), T_m es la temperatura media diaria; T_{max} es la temperatura máxima diaria ($^{\circ}\text{C}$); T_{min} es la temperatura mínima diaria ($^{\circ}\text{C}$) y T_0 se calcula en función de la duración del día (DL) con la ecuación (2).

$$T_0 = 12 - 0.5 * DL \quad (2)$$

DL se calcula con la ecuación (3), reportada por ALLEN et al. (1998).

$$DL = \left(\frac{24}{\pi}\right) * \omega s \quad (3)$$

Donde: π es el valor de Pi , que vale aproximadamente 3.14159; ωs es el ángulo de la radiación solar a la hora de la puesta del sol (radianes), que se calcula con la ecuación (4) reportada por ALLEN et al. (1998).

$$\omega s = \arccos[-\tan(\phi) * \tan(\delta)] \quad (4)$$

Dónde: ϕ es la latitud de la localidad (radianes) y δ es la declinación solar (radianes). La declinación solar se calcula con la ecuación (5), reportada por ALLEN et al. (1998).

$$\delta = 0.409 \operatorname{sen}\left(\left(\frac{2\pi J}{365}\right) - 1.39\right) \quad (5)$$

Donde: J es el número del día del año (Año Juliano).

Modelo de la FAO para estimar el rendimiento potencial de cultivos

La FAO (1981), propone un procedimiento para estimar el rendimiento potencial de un cultivo como parte de la metodología para realizar una Zonificación Agro-Ecológica (ZAE). De acuerdo con el procedimiento propuesto por la FAO (1981), para estimar los rendimientos potenciales de cualquier cultivo, para una localidad en particular se requiere disponer de la siguiente información: Latitud, T_{max} , y T_{min} diaria, irradiación solar global promedio diaria, duración del ciclo del cultivo y/o periodo de crecimiento, índice de área foliar (IAF) del cultivo de interés a una determinada edad, e índice de cosecha del cultivo de interés. Para ver en mayor detalle el procedimiento de cálculo se recomienda consultar a RIVERA-HERNÁNDEZ et al. (2012).

Los autores del presente estudio, han realizado al menos 40 trabajos de Zonificación AgroEcológica utilizando la metodología propuesta por la FAO, (1981) para igual número de cultivos tropicales; entre los que se incluye los de café arábica y robusta para el estado de Tabasco, México. En esos trabajos se estimaron los rendimientos potenciales del café tipo arábica, que van a servir de base para la comparación entre el método propuesto por la FAO y el ahora propuesto (ACEVES et al., 2011; 2020). Derivado de esos múltiples trabajos, se elaboró en Excel para el estado de Tabasco, la automatización del cálculo de los rendimientos potenciales para diferentes

cultivos y niveles de insumos; ya que el nivel de insumos afecta los valores del índice de área foliar (*IAF*) e índice de cosecha (*Ic*) respectivamente (FISCHER et al., 2012).

Procedimiento propuesto para estimar el rendimiento potencial para el cultivo de café

El procedimiento propuesto se basa en la relación existente entre la temperatura diurna promedio diaria mensual (T_{diu}) y la tasa fotosintética máxima (*TFM*) promedio diaria mensual de un cultivo de café tipo arábica. De acuerdo con lo reportado por FISCHER et al. (2012), bajo condiciones óptimas de T_{diu} (temperaturas entre 20 °C a 25 °C) para café tipo arábica, se esperarían valores de la *TFM* de 25 g m⁻² d⁻¹. Para obtener los valores de *TFM* para valores de T_{diu} menores a 20 °C y para valores de T_{diu} entre 25.1 °C a 40 °C se tomaron los valores reportados en la Tabla 2, y se les aplicó un análisis de regresión. La ecuación 6, estima valores de *TFM* para valores de T_{diu} menores a 20 °C. La ecuación 7, estima valores de *TFM* para valores de T_{diu} entre 25.1 °C y 30 °C, mientras que la ecuación 8, estima valores de *TFM* para valores de T_{diu} entre 30.1 °C y 40 °C respectivamente. Las ecuaciones 6, 7 y 8 presentaron coeficientes de determinación (R^2) superiores a 0.997.

$$TFM = -13.75 + 2.95 * T_{diu} - 0.05 * (T_{diu})^2 \quad \text{Para valores de } T_{diu} < 20 \text{ °C} \quad (6)$$

$$TFM = 25 - [(T_{diu} - 25)] * 3 \quad \text{Para valores de } T_{diu} \text{ entre } 25.1 \text{ °C y } 30 \text{ °C} \quad (7)$$

$$TFM = -T_{diu} + 40 \quad \text{Para valores de } T_{diu} \text{ entre } 30.1 \text{ °C y } 40 \text{ °C} \quad (8)$$

Usando las ecuaciones 6, 7 y 8 se puede obtener el patrón estacional de la *TFM* para cualquier estación climatológica selecta.

Procedimiento para el cálculo de la biomasa neta total anual para el cultivo de café

El cálculo de la biomasa neta total anual se puede realizar utilizando datos promedio mensuales o anuales diarios de las 3 variables antes mencionadas (*DL*, T_{max} y T_{min}).

A). Utilizando datos promedio diarios mensuales

Para calcular la biomasa neta total anual de un cultivo de café tipo arábica utilizando datos promedio diarios mensuales se proponen los siguientes 7 pasos:

1. Con los datos de *DL*, T_{max} y T_{min} calcular T_{diu} para cada mes del año.
2. Con los valores de T_{diu} calcular los valores de *TFM*. Utilizando las ecuaciones (6), (7) y (8); según sea el caso.

3. Con los valores de TFM calcular la biomasa bruta mensual total (BBT) en kilogramos por hectárea, utilizando la siguiente ecuación (9):

$$BBT = TFM * ND * 10 (kg ha^{-1}) \quad (9)$$

Donde ND es el número de días en el mes.

4. Con los valores de BBT calcular la biomasa bruta mensual total corregida (BBT_{corr}) por ciclo de crecimiento, utilizando la siguiente ecuación (10):

$$BBT_{corr} = BBT * K (kg ha^{-1}) \quad (10)$$

Donde k es el coeficiente de corrección por ciclo de crecimiento. En el caso del café tipo arábica el ciclo de crecimiento es de 270 días, según lo reportado por FISCHER et al. (2012). Así, el coeficiente de corrección (k) será $270/365 = 0.74$.

5. Para calcular la biomasa neta total mensual (BNT) se requiere restarle a la BBT_{corr} el consumo por respiración (C_R). El consumo por respiración se calcula con la siguiente ecuación (11):

$$C_R = BBT_{corr} * T_R (kg ha^{-1}) \quad (11)$$

Donde T_R es un coeficiente de respiración (adimensional) que representa la porción de la biomasa bruta que se consume por respiración y que está muy correlacionada con la temperatura promedio diaria (T_m), que se manifiesta en una relación exponencial de dicho coeficiente respecto a la T_m (ROSENBERG et al., 1983; DA ACOSTA et al., 1986; GLIFFORD, 2001; JONES, 2014; HUNTINGFORD et al., 2017). De acuerdo con GLIFFORD (2003), el T_R , que es una relación respiración/biomasa bruta; es una aproximación práctica y efectiva para asignarle valores a este coeficiente; ya que dichos valores son conservadores y se aplican a un amplio rango de cultivos, tasas de crecimiento, concentraciones de CO_2 y temperaturas (GLIFFORD, 2001). Para estimar el T_R se desarrolló una ecuación exponencial a partir del coeficiente de respiración (C_i) reportado por FAO, (1981) para estimar los rendimientos potenciales de un cultivo; normalizándolo para la temperatura diurna, a partir de modelos reportados por HUNTINGFORD et al. (2017) & HESKEL et al. (2016) y datos observados por DA ACOSTA et al. (1986); ROSENBERG et al. (1983) & JONES (2014), cuyos resultados son similares a los reportados por GLIFFORD (2001) y los anteriores autores. Así, el coeficiente de respiración (T_R) se estima en función del valor de la temperatura diurna. Tomando la siguiente expresión:

$$T_R = a * exp^{(b * T_{diu})} \quad (12)$$

Donde T_R aumenta exponencialmente a medida que se incrementa la temperatura diurna, y donde el coeficiente " a " tiene un valor de 0.1289 y el " b " de 0.0407. Resultando:

$$T_R = 0.1289 * \exp^{(0.0407 * T_{diu})} \quad (12a)$$

6. Con los valores de T_R se calcula C_R utilizando la ecuación (12a) y ese valor resultante se resta de BBT_{corr} para obtener la biomasa neta total mensual (BNT). Tal como se muestra en la ecuación (13):

$$BNT = BBT_{corr} - C_R \quad (13)$$

7. Para obtener la biomasa neta total anual (BNT_a) se suman las biomásas netas totales de cada uno de los meses.

B). Utilizando los promedios diarios anuales

Para calcular la biomasa neta total anual de un cultivo de café tipo arábica utilizando solo el promedio diario anual de DL , T_{max} y T_{min} se siguen los mismos 7 pasos anteriores, para obtener el valor anual de la BNT_a .

Cálculo del rendimiento potencial para el cultivo de café

Para obtener el rendimiento potencial (en este caso de café pergamino), se utiliza la siguiente ecuación (14):

$$Y_p = BNT_a * I_c \quad (14)$$

Donde: Y_p es el rendimiento potencial (café pergamino en kg ha^{-1}); BNT_a es la biomasa neta total anual e I_c es el índice de cosecha (adimensional), cuyo valor reportado por FISCHER et al. (2012) es de 0.100. Dado que se quiere estimar el rendimiento potencial de este cultivo se utilizó un I_c de 0.100, según lo reportado por FISCHER et al. (2012), para un nivel alto de insumos.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cálculo de la tasa de fotosíntesis máxima (*TFM*) para valores promedio mensuales

En el Tabla 3 se muestran los valores de la temperatura diurna promedio diaria mensual y anual resultante de aplicar las ecuaciones (1, 2, 3, 4, y 5) a la estación climatológica de Dos Patrias, Tacotalpa, México.

Tabla 3. Resultados del cálculo de la temperatura diurna promedio diaria mensual y anual, en el área de influencia de la estación climatológica de Dos Patrias, Tacotalpa, Tabasco, México.

Mes	<i>DL</i>	<i>T_{max}</i>	<i>T_{min}</i>	<i>T_{media}</i>	<i>To</i>	Cálculos intermedios				<i>T_{diu}</i>
Enero	11.05	26.7	17.4	22.1	6.47	0.814	0.727	1.8	1.301	23.4
Febrero	11.43	28.1	17.9	23.0	6.29	0.857	0.756	2.1	1.560	24.6
Marzo	11.88	30.6	19.5	25.1	6.06	0.910	0.789	2.4	1.882	26.9
Abril	12.40	33.0	21.4	27.2	5.80	0.973	0.826	2.7	2.200	29.4
Mayo	12.83	34.3	22.5	28.4	5.59	1.025	0.855	2.9	2.439	30.8
Junio	13.05	33.4	22.5	28.0	5.48	1.053	0.869	2.7	2.352	30.3
Julio	12.96	32.7	21.9	27.3	5.52	1.042	0.863	2.7	2.290	29.6
Agosto	12.60	32.7	21.8	27.3	5.70	0.996	0.840	2.6	2.151	29.4
Septiembre	12.09	31.8	21.9	26.9	5.95	0.935	0.805	2.2	1.759	28.6
Octubre	11.59	30.2	20.9	25.6	6.21	0.876	0.768	1.9	1.477	27.0
Noviembre	11.16	28.6	19.4	24.0	6.42	0.826	0.735	1.8	1.320	25.3
Diciembre	10.95	27.4	18.1	22.8	6.52	0.802	0.719	1.8	1.269	24.0
Promedio anual	12.00	30.8	20.4	25.6	6.00	0.926	0.796	2.3	1.833	27.4

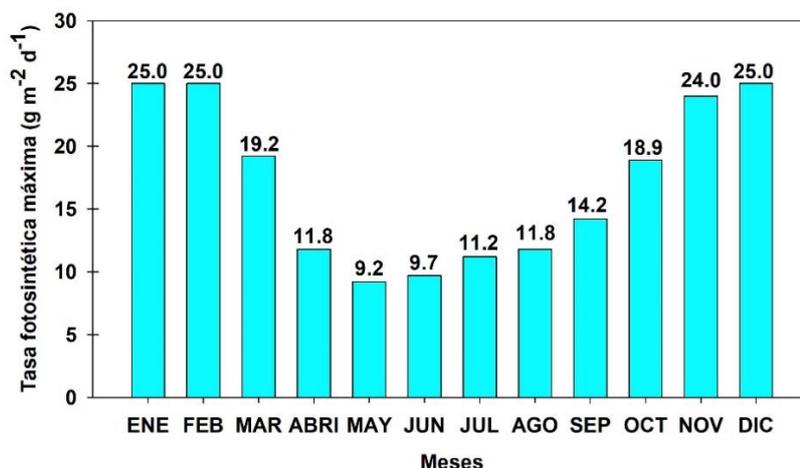
Con los datos de *T_{diu}* se procedió a calcular la *TFM* promedio diaria mensual y anual utilizando las ecuaciones (7) y (8). La *T_{diu}* promedio diaria mensual y anual en el estado de Tabasco no es menor a 20 °C (Tabla 4).

Tabla 4. Resultados del cálculo de la tasa fotosintética máxima promedio diaria mensual y anual, en el área de influencia de la estación climatológica de Dos Patrias, Tacotalpa, Tabasco, México.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
<i>TFM</i>	25.0	25.0	19.2	11.8	9.2	9.7	11.2	11.8	14.2	18.9	24.0	25.0	17.1

La Figura 2, muestra la distribución temporal de las *TFM* por mes, de la estación climatológica de Dos Patrias, Tacotalpa, donde se observa que las *TFM* varían a lo largo del año entre 8.9 a 25.0 g m⁻² d⁻¹. Es notorio como en el mes más cálido del año (mayo), la *TFM* es casi un tercio de la que ocurre en los meses de diciembre, enero y febrero.

Figura 2. Distribución promedio diaria mensual de las tasas fotosintéticas máximas del cultivo de café tipo arábica, en el área de influencia de la estación climatológica de Dos Patrias, Tacotalpa, Tabasco, México.



A. Resultados del cálculo de la biomasa neta total mensual (BNT), utilizando datos promedio diario mensual de la tasa fotosintética máxima

Se aplicaron las ecuaciones 9, 10, 11, 12 y 13, para obtener la BNT mensual del cultivo de café tipo arábica. En la Tabla 5 se muestran los resultados.

En la Tabla 5, se muestra los cálculos de la biomasa neta mensual y total anual de café tipo arábica, para el área de influencia de la estación climatológica de Dos Patrias. Como puede apreciarse en dicha tabla, la biomasa neta total mensual sigue el mismo patrón de comportamiento de la TFM que se muestra en la Figura 2. Es decir, existe una estrecha relación entre la TFM y la BNT mensual; independientemente del coeficiente de respiración (T_R) utilizado.

Tabla 5. Muestra los resultados del cálculo de la biomasa neta promedio diaria mensual (BNT; kg ha⁻¹) y biomasa neta total anual (BNT_a; kg ha⁻¹), a partir de datos promedio diario mensuales de la temperatura diurna (T_{diu}), en el área de influencia de la estación climatológica de Dos Patrias, Tacotalpa, Tabasco, México.

ND (días)	T_{diu} (°C)	TFM (g m d ⁻¹)	BBT (kg ha ⁻¹)	Ajuste por ciclo	BBT _{CORR} (kg ha ⁻¹)	T_R (adim)	C_R (kg ha ⁻¹)	BNT (kg ha ⁻¹)
31	23.4	25.0	7750.0	0.74	5735.0	0.333	1912.2	3822.8
28	24.6	25.0	7000.0	0.74	5180.0	0.350	1814.3	3365.7
31	26.9	19.2	5952.8	0.74	4405.1	0.386	1699.3	2705.8
30	29.4	11.8	3539.9	0.74	2619.5	0.427	1117.2	1502.3
31	30.8	9.2	2840.0	0.74	2101.6	0.452	950.4	1151.2
30	30.3	9.7	2909.5	0.74	2153.0	0.442	952.6	1200.4
31	29.6	11.2	3481.0	0.74	2576.0	0.430	1107.2	1468.8
31	29.4	11.8	3657.1	0.74	2706.3	0.427	1154.3	1552.0
30	28.6	14.2	4251.9	0.74	3146.4	0.413	1299.4	1847.0
31	27.0	18.9	5864.7	0.74	4339.9	0.387	1680.6	2659.3
30	25.3	24.0	7212.3	0.74	5337.1	0.361	1928.0	3409.1
31	24.0	25.0	7750.0	0.74	5735.0	0.343	1964.9	3770.1
Total								28454.5

B. Resultados del cálculo de la biomasa neta total anual (BNT_a) utilizando datos promedio diarios anuales

Con el objeto de saber si utilizando promedios diarios anuales se obtiene un resultado similar de la BNT_a , que utilizando promedios mensuales, se realizó el cálculo de la BNT_a con los valores promedios anuales diarios, cuyo resultado se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados del cálculo de la biomasa neta total anual (BNT_a ; kg ha^{-1}), a partir de datos promedio diario anuales, en el área de influencia de la estación climatológica de Dos Patrias, Tacotalpa, Tabasco, México.

DL	T_{max}	T_{min}	T_{med}	T_{diu}	TFM	$*BBT_a$	Ajuste por ciclo	$*BBT_{a\text{ corr}}$	T_R	C_R	BNT_a
(h)	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	(kg ha^{-1})		(kg ha^{-1})	(adim)	(kg ha^{-1})	(kg ha^{-1})
12.0	30.8	20.4	25.6	27.4	17.8	64802.1	0.74	47953.6	0.393	18845.8	29107.8

(*) Dónde BBT_a es la biomasa bruta total anual y $BBT_{a\text{ corr}}$ es la biomasa bruta total corregida.

Al comparar el valor de la BNT_a de la Tabla 5 ($28,454.5 \text{ kg ha}^{-1}$) y de la Tabla 6 ($29,107.8 \text{ kg ha}^{-1}$) se puede apreciar que ambos resultados son muy similares. El error relativo entre ambos resultados es menor a 2.5 %. Lo que significa que se puede llegar al mismo resultado utilizando solo datos de temperatura promedio diaria anual.

En este trabajo se encontró que trabajar con promedio diarios anuales de la temperatura diurna y la tasa fotosintética máxima, da prácticamente el mismo resultado que trabajar con el promedio diario mensual, con la ventaja de que utilizando datos promedio diario anual es más fácil, dado que la información requerida es mucho accesible a nivel nacional y mundial.

Ejemplificación del uso de datos promedio diario anuales para calcular la biomasa neta total anual

Para ejemplificar el procedimiento de cálculo, se utilizaron los datos de DL , T_{max} , y T_{min} promedio diario anual de la estación climatológica de Dos Patrias.

Los datos iniciales son: $DL = 12$ horas; $T_{max} = 30.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y $T_{min} = 20.4$.

Con esos datos de entrada se calcula T_{diu} , con la ecuación (1). El resultado es: $T_{diu} = 27.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Como T_{diu} es mayor que $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ se utiliza la ecuación (7) para calcular la TFM promedio diaria anual. Sustituyendo el valor en la ecuación 7. $TFM = 25 - [(27.4 - 25) * 3] = 17.754 \text{ g m}^{-2} \text{d}^{-1}$.

Para convertir los valores de TFM en BBT (kg ha^{-1}), se utiliza la ecuación (9); solo que, en este caso, ND es igual a 365 días y la BBT resultante es la biomasa bruta total anual (BBT_a): El resultado sustituyendo valores es: $BBT_a = [(17.754 * 365) * 10] = 64,802.1 \text{ kg ha}^{-1}$.

Para convertir la BBT_a en biomasa bruta total corregida por ciclo de crecimiento ($BBT_{a\text{ corr}}$), se utiliza la ecuación (10). El coeficiente de corrección (k) es 0.74, resultante de dividir el número

de días del ciclo de crecimiento (270) entre los 365 días del año (FISCHER et al. 2012). El resultado sustituyendo valores es: $BBT_{a\text{ corr}} = 64,802.1 * 0.74 = 47,953.6 \text{ kg ha}^{-1}$. Para calcular el coeficiente de respiración (T_R) se utiliza la ecuación (12a). Sustituyendo valores el resultado es: $T_R = 0.1289 * \exp^{0.0407 * 27.4} = 0.393$.

Para calcular el consumo total por respiración (C_R) se utiliza la ecuación (11). Sustituyendo valores: $C_R = 47,953.6 * 0.393 = 18,845.8 \text{ kg ha}^{-1}$.

Así, la obtención de la biomasa neta total anual es el resultado de restarle a la $BBT_{a\text{ corr}}$ el consumo de respiración, tal y como se muestra en la ecuación (13). Sustituyendo valores el resultado es: $BNT_a = 47,953.6 - 18,845.8 = 29,107.8 \text{ kg ha}^{-1}$.

Al comparar este resultado con el obtenido en la Tabla 5 para datos promedio mensuales diarios ($28,454.5 \text{ kg ha}^{-1}$) se puede apreciar que son muy similares, con un error relativo entre ambos resultados del 2.29 %.

Comparación de resultados entre el procedimiento propuesto y el método de la FAO

Los rendimientos potenciales estimados por este procedimiento con promedio diario mensuales y/o anuales, son muy similares a los $28,615.5 \text{ kg ha}^{-1}$ obtenidos por ACEVES et al. (2011) para café arábica utilizando el método FAO (1981), para áreas muy aptas y con muy buen potencial productivo del área de influencia de la estación climatológica de Dos Patrias; con un error relativo menor a 0.60 % (0.57 %) cuando se calcula con promedios diarios mensuales y menor al 1.7 % (1.69 %) cuando se calcula con promedios diarios anuales.

Cuando se considera el rendimiento promedio de todo el estado de Tabasco ($28,782.6 \text{ kg ha}^{-2}$); aún así, el error relativo es menor al 1.2 % ya sea utilizando promedios diarios mensuales y/o anuales. De esta manera, las diferencias entre ambos métodos son insignificantes; por lo que el método propuesto además de dar resultados muy similares, tiene la ventaja de que no requiere de datos de irradiación solar global que son difíciles de obtener.

Otra ventaja del nuevo procedimiento que se propone es que solo requiere de datos promedio diario anuales de temperatura y duración del día, que son de muy fácil acceso en todas las estaciones climatológicas existentes en el estado de Tabasco, en México y gran parte del mundo.

Es preciso enfatizar que los anteriores rendimientos son válidos bajo las siguientes condiciones: son para cultivo de café bajo sombra, con una edad de 4 a 7 años y para siembras (1 m x 2 m) que da una densidad de población de 5,000 árboles por hectárea. Ésta última condición es muy importante, ya que la relación entre la topología y los rendimientos no es lineal; pues los rendimientos se incrementan exponencialmente a espaciamientos de siembra menores. Asimismo, señalar que, bajo condiciones de campo, FISCHER et al. (2012) reportan que la tasa fotosintética

promedio equivale entre 40 % al 60 % (50 % en promedio) al de las tasas fotosintéticas máximas propuestas en la Tabla 2.

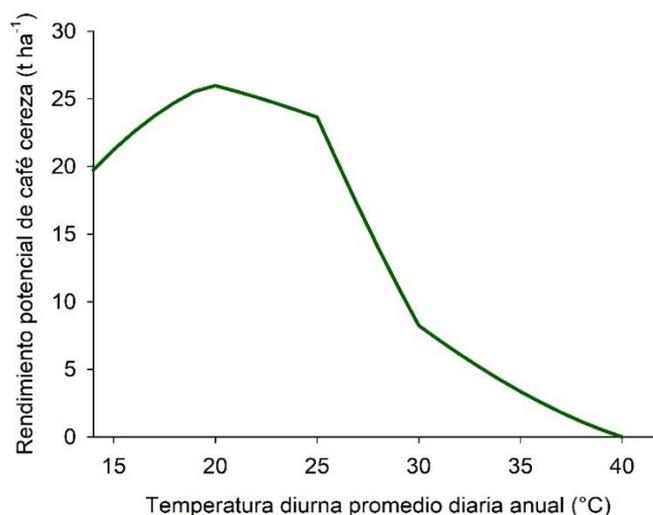
Cálculo del rendimiento potencial para el cultivo de café tipo arábica

Para obtener el rendimiento potencial total anual (en este caso de café pergamino), se multiplica la BNT_a por el índice de cosecha (I_c) del cultivo de café (0.100). Para ello se utiliza la ecuación (14) y el resultado es: $Y_p = 29,107.8 * 0.100 = 2,910.7 \text{ kg ha}^{-1} = 2.91 \text{ t ha}^{-1}$ de café pergamino = 15.72 t ha^{-1} de café cereza.

Generalización para estimar el rendimiento potencial

Como se mostró en el desarrollo del trabajo, es posible estimar el rendimiento potencial del café tipo arábica a partir de la temperatura diurna promedio diaria anual. Generalizando para otras temperaturas diurnas en un rango de 14 °C a 40 °C se pudo ampliar dicha relación que se presenta en la Figura 3, donde se muestra la relación entre la temperatura diurna promedio diaria anual y los rendimientos potenciales del café arábica en cereza, para una densidad de 5,000 plantas por hectárea. El rendimiento de café cereza es igual al de café pergamino multiplicado por un factor de 5.4.

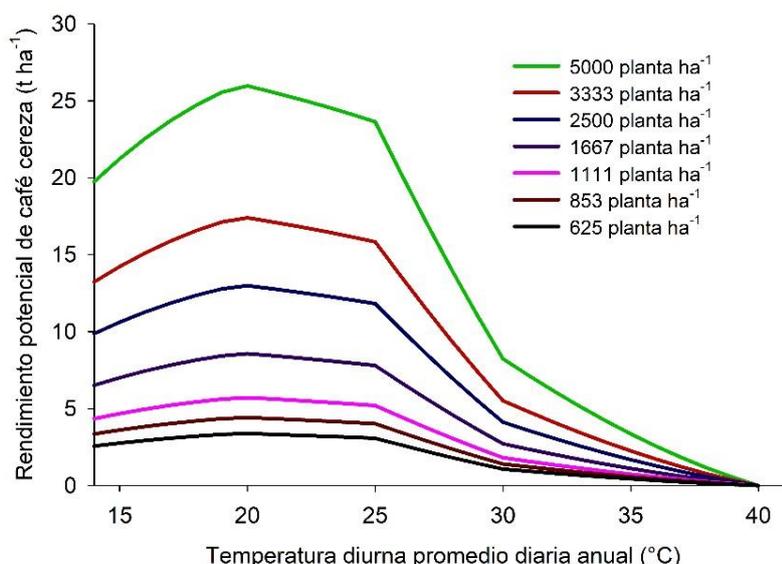
Figura 3. Relación entre la temperatura diurna promedio diaria anual y el rendimiento potencial de café cereza (*Coffea arabica* L.) para una densidad de siembra de 5,000 plantas por hectárea (espaciamiento 2x1).



En la Figura 3, se observa que, aún teniendo la misma tasa fotosintética máxima a temperaturas diurnas entre 20 °C y 25 °C, los rendimientos potenciales son diferentes debido a los diferentes coeficientes de respiración, pues los rendimientos potenciales se ven afectados por el

consumo por respiración, que es diferente para cada temperatura. Así, los rendimientos potenciales de café cereza a 20 °C y 25 °C serían de 25.9 t ha⁻¹ y 23.5 t ha⁻¹ respectivamente. A continuación se realizó una adecuación en la estimación de los rendimientos potenciales de café tipo arábica para diferentes densidades de plantación (Figura 4).

Figura 4. Relación entre la temperatura diurna promedio diaria anual y el rendimiento potencial de café cereza (*Coffea arabica* L.) para diferentes densidades de siembra.



De acuerdo a las relaciones anteriores, hipotéticamente el rendimiento potencial máximo se obtiene cuando en una localidad todos los meses del año la temperatura diurna promedio diaria es igual a 20 °C, ya que implica una tasa fotosintética máxima de 25 g m⁻² d⁻¹ para todos los meses; que da como resultado una biomasa neta total anual de 47,880.9 kg ha⁻¹, equivalente a un rendimiento de café cereza de 25.9 t ha⁻¹ para un índice de cosecha de 0.100.

Procedimiento simplificado para estimar los rendimientos potenciales de café cereza

En las Figuras 4 y 5 se aprecia que el rendimiento de café cereza muestra una tendencia cuadrática (parabólica) a valores de la temperatura diurna para los intervalos entre 14 °C y 30 °C y entre 30 °C a 40°C que puede expresarse mediante la siguiente ecuación general para ambos intervalos:

$$Y_p = a + (b * X) + [c * (X)^2] \tag{15}$$

Dónde, Y_p es el rendimiento potencial de café cereza ($t\ ha^{-1}$) y X es la temperatura diurna promedio diaria anual; a , b y c son los coeficientes de regresión correspondientes. En la Tabla 7, se muestran los coeficientes de regresión y determinación para la estimación del rendimiento potencial a diferentes densidades de plantas y a rangos de valores de la temperatura diurna entre $14\ ^\circ C$ a $30\ ^\circ C$ y entre $30.1\ ^\circ C$ a $40.0\ ^\circ C$.

Tabla 7. Valores de los coeficientes de regresión (R^2) y determinaciones resultantes de aplicar la ecuación (15), para las diferentes densidades de siembra del cultivo de café tipo arábica, para calcular su rendimiento potencial.

Número de plantas por hectárea	T_{diu} entre $14\ ^\circ C$ y $30\ ^\circ C$			R^2	T_{diu} entre $30.1\ ^\circ C$ y $40\ ^\circ C$			R^2
	Coeficientes de regresión				Coeficientes de regresión			
	a	b	c		a	b	c	
5000	-50.356	7.5740	-0.1875	0.985	70.622	-3.0144	0.0312	1.00
3333	-33.738	5.0746	-0.1256	0.985	47.317	-2.0197	0.0209	1.00
2500	-25.178	3.7870	-0.0938	0.985	35.311	-1.5072	0.0156	1.00
1667	-16.617	2.4994	-0.0619	0.985	23.305	-0.9948	0.0103	1.00
1111	-11.078	1.6663	-0.0413	0.985	15.537	-0.6632	0.0069	1.00
833	-8.5605	1.2876	-0.0319	0.985	12.006	-0.5125	0.0053	1.00
625	-6.5462	0.9846	-0.0244	0.985	9.1808	-0.3919	0.0041	1.00

Los resultados del Tabla 7 muestran que la relación entre la temperatura diurna anual y los rendimientos de café cereza a diferentes densidades de siembra, tienen una relación parabólica, con un elevado coeficiente de determinación ($R^2 \geq 0.98$) para el intervalo de $14\ ^\circ C$ a $30\ ^\circ C$ y un ajuste “casi” perfecto en el intervalo de $30.1\ ^\circ C$ a $40\ ^\circ C$ ($R^2 = 1.00$).

Así, utilizando los datos reportados en la Tabla 7, se pueden obtener las ecuaciones resultantes para estimar el rendimiento potencial del café tipo arábica (*Coffea arabica* L.) para una temperatura diurna entre $14\ ^\circ C$ y $30\ ^\circ C$ para diferentes densidades de plantas por hectárea.

Así, para una densidad de 5,000 plantas por hectárea (Y_{5000}):

$$Y_{5000} = -50.536 + (7.5740 * X) - [0.1875 * (X)^2] \quad (17)$$

Para una densidad de 2,500 plantas por hectárea (Y_{2500}):

$$Y_{2500} = -25.178 + (3.7870 * X) - [0.0938 * (X)^2] \quad (18)$$

Para una densidad de 1,111 plantas por hectárea (Y_{1111}):

$$Y_{1111} = -11.078 + (1.6663 * X) - [0.0413 * (X)^2] \quad (19)$$

Para simplificar el procedimiento de la estimación del rendimiento potencial de café tipo arábica y utilizando los datos reportados en la Tabla 7, se puede simplificar a solo 3 pasos:

1. Con los valores de la T_{max} y T_{min} y DL promedio diaria anual, se calcula la temperatura diaria promedio diaria anual (T_{diu}) con las ecuaciones (1, 2, 3, 4 y 5).
2. Con el valor de T_{diu} , se calcula la tasa fotosintética máxima promedio diaria anual (TFM). Para calcular la TFM se utilizan las ecuaciones (6), (7) y (8); según sea el caso.
3. Con el valor de TFM , se calcula el rendimiento potencial (Y_p) de café cereza para la densidad de siembra deseada, utilizando la ecuación (15) y los coeficientes de regresión que se muestran en la Tabla (7).

Este procedimiento simplificado es un caso particular y aplicable solo para café tipo arábica. Para otro cultivo diferente, se sugiere utilizar las ecuaciones de la (1) a la (13), descritas en detalle en este documento. Es importante señalar que ambos procedimientos son válidos solo para aquellas áreas con suelo y clima óptimo para el crecimiento y desarrollo del cultivo seleccionado; es decir, áreas clasificadas como muy aptas por la FAO (1981). El rendimiento potencial está influenciado por el índice cosecha y el índice de área foliar; los cuales dependen de la densidad de siembra de la plantación. Así una plantación con 5,000 plantas por hectárea y otra con 2,500 tendrán diferente área foliar e índice de cosecha.

4 CONCLUSIÓN

El procedimiento propuesto para determinar el rendimiento potencial del café tipo arábica para una localidad, a partir de datos reportados de las tasas fotosintéticas máximas, da resultados muy similares al procedimiento de Zonificación Agro-Ecológica (ZAE) propuesto por la FAO, con una diferencia menor al 0.3% y 2.3% cuando se utilizan datos promedio diario mensuales y anuales, respectivamente. El procedimiento propuesto en este trabajo tiene además la ventaja de que solo requiere datos promedios diarios mensuales y/o anuales de temperatura y duración del día, que son de muy fácil acceso.

REFERENCIAS

- ACEVES-NAVARRO, L. A.; RIVERA-HERNÁNDEZ, B.; SANTILLÁN-FERNÁNDEZ, A.; ARRIETA-RIVERA, A.; JUÁREZ-LÓPEZ, J. F.; GUTIERREZ-BURÓN, R. Impacto del cambio climático en la adaptación del cultivo de café (*Coffea arabica* L.) en Tabasco, México. *Agroproductividad*, v. 13, n. 4, p. 53-58, 2020.
- ACEVES, N. L. A.; JUÁREZ, L. J. F.; PALMA, L. D. J.; RIVERA, H. B.; HERNÁNDEZ, G. M. Donde Cultivar Café en Tabasco. Informe Técnico. Colegio de Postgraduados-Fundación Produce Tabasco, A.C. 2011, 41 p.
- ALLEN, R.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998, 301 p.
- DA ACOSTA, J. M. N.; ROSENBERG, N. J.; VERMA, S. B. Respiratory release of CO₂ in alfalfa and soybean under field conditions. *Agric. For. Meteorol*, v. 37, 2, p. 143-157, 1986.
- FAO, (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Report on the Agro-ecological Zones Project. Vol. 1: Methodology and Results for Africa. World Soils Report No. 8. Rome, Italia. 1981.
- FISCHER, G.; NACHTERGAELE, F. O.; PRIELER, S.; TEIXEIRA, G.; VAN VELTHUIZEN, H.; VERELST, L., WIBERG, D. Global Agro-Ecological Zones (GAEZ v3.0): Model Documentation. IIASA/FAO, Luxemburg, Austria. 2012, 179 p.
- GLIFFORD, R. M. Plant respiration in productivity models: Conceptualisation, representation and issues for global terrestrial carbón-cycle research. *Functional Plant Biology*, v. 30, n. 2, p. 171-186, 2003.
- GLIFFORD, R. Plant Respiration. In: Kirschbaum, M. U. F.; Mueller, R. (Ed). Net Ecosystem Exchange. Cooperative Research Center for Greenhouse Accounting. Canberra, Australia. 2001, p. 38-42.
- HESKEL, M. A.; O'SULLIVAN, O. S.; REICH, P. B.; TJOELKER, M. G.; WEERASINGHE, L. K.; PENILLARD, A.; EGERTON, J. J. G.; CREEK, D.; BLOOMFIELD, K. J.; XIANG, J.; SINCA, F.; STANGL, Z. R.; MARTINEZ-DE LA TORRE, A.; GRIFFIN, K. L.; HUNTINGFORD, C.; HURRY, V.; MEIR, P.; TURNBULL, M. H.; ATKI, O. K. Convergence in the temperature response of leaf respiration across biomes and plant functional types. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v.113, n. 14, p. 3832-3837, 2016.
- HUNTINGFORD, C.; ATKIN, O. K.; MARTINEZ-DE LA TORRE, A.; MERCADO, L. M.; HESKEL, M. A., HARPER, A. B.; BLOOMFIELD, K. J.; O'SULLIVAN, O. S.; REICH, P. B.; WYTHERS, K. R.; BUTLER, E.E.; CHEN, M.; GRIFFIN, K. L.; MEIR, P.; TJOELKER, M. G.; TURNBULL, M. H.; SITCH, S.; WILTSHIRE, A.; MALHI, Y. Implications of improved representations of plant respiration in a changing climate. *Nature Communications*, v. 8, n. 1602, p. 1-11, 2017.
- IMTA, (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). (2009). ERIC III v. 2. Extractor Rápido de Información Climatológica. Jiutepec, Morelos, México.

JONES, H. G. Temperature. In: JONES, H. G. (Ed). Plants and Microclimate. A quantitative approach to environmental plant physiology (3rd Ed.). Cambridge University Press, U. K. 2014, p. 224-254.

LÖWENSTEIN, H. M.; LANTINGA, R.; RABBINGE, R.; VAN KEULEN, H. Principles of Production Ecology: Text of course F 300-001, pp 8. Fig. 8. Department of Theoretical Production Ecology, Wageningen University and Research Centre, Wageningen, The Netherlands. 1995, 247 p.

RIVERA-HERNÁNDEZ, B.; ACEVES-NAVARRO, L. A.; JUÁREZ-LÓPEZ, J. F.; PALMA-LÓPEZ, D. J.; GONZÁLEZ-MANCILLAS, R.; GONZÁLEZ-JIMÉNEZ, V. Zonificación agroecológica y estimación del rendimiento potencial del cultivo de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en el estado de Tabasco, México. *Avances en Investigación Agropecuaria*, v.16, n.1, 29-47, 2012.

ROSENBERG, N. J.; BLAD, B. L.; VERMA, S. B. Microclimate: the biological environment (2nd Ed.) John Wiley & Sons. 1983, 528 p.