

## EFFECTO DEL ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO SOBRE EL ESTADO VEGETATIVO DE LA PLANTA DE CACAO<sup>1</sup>

*Jhon Alexander Villalaz-Pérez<sup>2</sup>; José Ezequiel Villarreal-Núñez<sup>3</sup>;  
Adolfo Santo-Pineda<sup>4</sup>; Abiel Gutiérrez-Lezcano<sup>5</sup>; Agustín Merino<sup>6</sup>*

### RESUMEN

Con el objetivo de evaluar de forma preliminar el índice de estrés hídrico en el cultivo de cacao, se realizó un experimento en dos ambientes (semi controlado y en campo abierto), durante los años 2020 y 2021, en el distrito de Almirante, Bocas del Toro (Panamá). En el ambiente semi controlado se evaluaron cuatro tratamientos y cinco repeticiones (20 plántones) en un diseño completamente al azar. Los tratamientos consistieron en distintos regímenes de riego, donde el T1 = testigo; T2 = 60% de humedad; T3 = capacidad de campo; T4 = punto de marchitez permanente. En campo abierto se realizó en una plantación de cacao donde se monitoreo 24 plántones. En ambos ambientes se midieron índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), temperatura del suelo y planta (hojas) utilizando plántones de tres meses de edad del genotipo de cacao AS-CP 26-61 Mulato (morado y blanco). En el primer estudio se monitoreo hasta que las plantas del T4 se marchitaron y murieron. En campo abierto se evaluó en un periodo de nueve meses haciendo coincidir los meses de mayor y menor precipitación. Se encontró que con un intervalo de porcentaje de humedad en las hojas de 20 a 62% el cultivo presentó un NDVI de 0,40 a 0,80, siendo mayormente favorable valores próximos a 1. Por otro lado, para el período estudiado el cultivo mostró estrés hídrico en los meses de marzo a mayo. Se concluye que, las plantas de cacao presentaron un buen vigor vegetal, de acuerdo con el NDVI, aunque estuvieron afectadas con un índice de estrés hídrico por temperatura en dos meses no consecutivos, lo que podría afectar las distintas fases fenológicas repercutiendo en la baja producción.

**Palabras claves:** Inceptisol, medio ambiente natural, régimen de humedad, temperatura, vegetación.

<sup>1</sup>Recepción: 14 de marzo de 2023. Aceptación: 20 de septiembre de 2023. Proyecto de Investigación e Innovación para el cultivo de cacao en sistemas agroforestales en Bocas del Toro y Comarcas.

<sup>2</sup>Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá (IDIAP), Centro de Innovación Agropecuaria de Divisa (CIA Divisa). e-mail: [jvillalaz14@gmail.com](mailto:jvillalaz14@gmail.com); ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-5382-5549>

<sup>3</sup>IDIAP, CIA Divisa. e-mail: [jevilla38@gmail.com](mailto:jevilla38@gmail.com); ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1317-1960>

<sup>4</sup>IDIAP, CIA Divisa. e-mail: [asantospineda@gmail.com](mailto:asantospineda@gmail.com); ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9561-2103>

<sup>5</sup>IDIAP, CIA Bocas del Toro. e-mail: [abiel.gutierrez@yahoo.es](mailto:abiel.gutierrez@yahoo.es)

<sup>6</sup>Universidad Santiago de Compostela. Lugo, España. Departamento de Edafología y Química Agrícola. e-mail: [agustin.merino@usc.es](mailto:agustin.merino@usc.es); ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3866-7006>



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

## EFFECT OF THE WATER STRESS INDEX ON THE VEGETATIVE STATUS OF THE COCOA PLANT

### ABSTRACT

The preliminary aim of this study was to evaluate the water stress index as an indicator of the absorption of water by the plant and its effect on the vegetative growth of the cocoa crop. An experiment was carried out in two environments (semi controlled and open field), during the years 2020 and 2021, in Almirante district, Bocas del Toro (Panama). In the semi controlled environment, four treatments and five repetitions (20 seedlings) were evaluated in a completely randomized design. The treatments consisted of different irrigation regimes, where T1= Witness; T2 = 60% humidity; T3= field capacity; T4= permanent wilting point. In the open field, it was carried out in a cocoa plantation where 24 seedlings were monitored. In both environments, normalized difference vegetation index (NDVI), soil temperature and plant (leaves) temperatures were measured using three-month-old seedlings of the improved AS-CP 26-61 cacao genotype. The data in the first study was monitored until the T4 plants died. In the open field, it was evaluated over a period of nine months, coinciding with the months of greatest and least rainfall. It was found that with a leaf humidity interval of 20 to 62%, the crop will present an NDVI of 0.40 to 0.80, with values close to 1 being mostly favorable. On the other hand, for the period studied, the crop showed water stress in the months of March and May. It is concluded that cocoa plant presented a good vegetal vigor according to the NDVI, although they were affected with an index of water stress due to temperature in two non-consecutive months, which could affect the different phenological phases, affecting the low production.

**Keywords:** Inceptisol, natural environment, humidity, temperature, vegetation.

### INTRODUCCIÓN

El estrés hídrico afecta a la planta de cacao en el crecimiento inicial, atrasando el desarrollo vegetativo y provocando, en muchos casos, efectos desventajosos en el metabolismo y fotosíntesis (García - Lozano, 2014; Janani et al., 2019). En la vegetación es causado principalmente por déficit de humedad en la zona de la raíz, haciendo que las hojas de la planta cierren sus estomas para minimizar la pérdida de agua por transpiración (Girolimetto, 2014). El cacao (*Theobroma cacao* L.), es considerado como una planta hidrófila, siendo la humedad del suelo un factor ambiental principal que induce los brotes vegetativos y estimula la floración. La sequía puede afectar negativamente estos procesos



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

fisiológicos del cultivo (García - Lozano y Moreno - Fonseca, 2016), como la fructificación y madurez del fruto de cacao (Sosa y Ramírez, 2020).

Los cambios ambientales activados por la sequía y la falta de agua en el cultivo de cacao han sido estudiados por varios investigadores, entre estos Daymond y Hadl (2004); Balasimha et al. (2013). Cuando los árboles evapotranspiran durante períodos de temperatura alta, la humedad resultante acumulada en el suelo en meses no es suficiente para satisfacer la demanda de agua en la planta (Medina y La liberte, 2017).

La diferencia que existe entre la temperatura del cultivo y la temperatura del aire, y del suelo han sido empleados como índices asociados al estado hídrico de la vegetación (Nicols et al., 2010). En general, el cacao necesita precipitaciones uniformes repartidas durante todo el año con lluvias promedias que oscilan entre 1500 y 2800 mm por año con un mínimo mensual de 100 mm (International Cocoa Organization [ICCO], 2018).

El potencial hídrico en el tejido foliar y el crecimiento de la planta de cacao se pueden describir como variables fisiológicas muy sensibles al exceso o déficit de agua (García Lozano y Moreno – Fonseca, 2016). Estudios realizados en Colombia por García - Lozano (2014), para tres clones de cacao, reportó diferencias en la fotosíntesis, transpiración y resistencia estomática durante la disminución gradual de los contenidos de humedad del suelo y de la hoja, encontraron correlación positiva alta entre el potencial hídrico foliar y la fotosíntesis.

Por otra parte, el cambio climático ha afectado diversos cultivos, entre estos el cacao tomando mayor importancia los estudios de variación de régimen de lluvia y temperatura (suelo y planta) que pueden interferir en el excesos o déficit de lluvias (Lau et al., 2011).

### **Falta de lluvia en el momento adecuado**

Los productores de cacao de algunas regiones de Latinoamérica (p.ej., República Dominicana, Costa Rica, Ecuador y Panamá) detectaron mermas de la producción, que se atribuyen a crecientes períodos de sequía y altas temperaturas que, además de afectar al



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

estado fisiológico de la planta, favorecen la aparición de plagas y enfermedades, afectando a la producción (Medina y La liberte, 2017). En relación con, algunos autores mostraron una anomalía por un mayor período de sequía en muchas regiones caribeñas, como consecuencia del calentamiento global (Herrera et al., 2018), incidiendo en las etapas de fructificación y madurez del fruto de cacao (Sosa y Ramírez, 2020).

Ante las condiciones climáticas adversas, donde cada vez se presentan temporadas largas sin lluvias (Samaniego et al., 2021), es necesario conocer si la absorción de agua por el cultivo es suficiente para evitar el estrés en los árboles. Existen estudios que demostraron la resistencia al déficit de agua de genotipos de cacao en la cual tienen un mecanismo eficiente de regulación estomática que limitan la transpiración afectando la fotosíntesis (De Almeida y Valle, 2001).

Por otro lado, el uso de materiales genéticos mejorados de cacao pueden ser la alternativa a la variabilidad climática que provoca altas temperaturas y periodos extremos de sequias (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2016). Por esta razón, el uso del material genéticamente mejorado como clon colección Panamá (AS-CP 26-61) fino de aroma pudiendo ser una alternativa para los productores de Panamá. Se trata de un genotipo muy interesante por sus alto rendimiento y alta calidad (Gutiérrez, 2020).

Es necesario implementar herramientas que nos ayuden a corroborar si las plantas de cacao pueden presentar un estrés hídrico que comprometa a largo plazo el rendimiento del cultivo. El objetivo de este primer ensayo fue evaluar de forma preliminar el índice de estrés hídrico como indicativo de la absorción del agua por la planta y su efecto en el crecimiento vegetativo del cultivo de cacao.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Descripción general de la zona de estudio

El estudio se realizó en el distrito de Almirante, Bocas del Toro (Panamá). El clima de Bocas del Toro según Köppen (1936), actualizado por Peel et al. (2007), se clasifica como clima tropical muy húmedo. La precipitación media anual es 2735 mm. La



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

temperatura media anual se encuentra en 24,3° C (Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia [IGNTG], 2007). Se verificaron aumentos de la temperatura media entre 0,5° C y 3° C, entre los años 1901 y 2012 en las regiones de América Latina y el Caribe se redujo la precipitación debido al cambio climático, y al norte de la República de Panamá y Centroamérica (Bofill, 2022).

Los suelos en el distrito de Almirante (ver Cuadro) corresponden al orden Inceptisol (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos [USDA], 2014; Villalaz-Pérez et al., 2021). El contenido de carbonó orgánico en el suelo varía de 0,7 % a 7,8 %, que van de bajos a altos y el pH presenta niveles de muy ácidos a ácidos (4,2 a 5,9) y las texturas van de francas a franca arenosa (Name y Cordero, 1987; Villalaz-Pérez et al., 2021).

### **Diseño experimental de los ensayos de investigación**

El estudio consistió en evaluar en dos ambientes (semi controlado y ambiente natural o campo abierto) el índice de estrés hídrico por temperatura del suelo y cultivo, tomando en cuenta el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y la humedad del cultivo, durante el 2020 y 2021.

La primera investigación se realizó en ambiente semi controlado (Figura 1), en una casa de vegetación. El segundo estudio se realizó en ambiente natural o campo abierto (Figura 2) con un cultivar comercial de cacao, colindante a la casa de vegetación en el distrito de Almirante, Bocas del Toro (Panamá), cuyas coordenadas geográficas son 9° 16' 33" de latitud Norte y 82° 25' 6" de longitud Oeste.

En ambos ambientes se utilizaron plántones de tres meses de edad del genotipo de cacao criollo mejorado y codificado en Panamá como: AS-CP 26-61.



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



**Figura 1. Ensayo en ambiente semi controlado, utilizando plantas de cacao del Clon AS-CP-2661.**



**Figura 2. Ensayo en ambiente natural o campo abierto, utilizando plantas de cacao del Clon AS-CP-2661 ubicado en Almirante, provincia de Bocas del Toro, República de Panamá.**



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

En el ambiente semi controlado, se establecieron cuatro tratamientos y cinco repeticiones (20 plantones) en un diseño completamente al azar. Con un tensiómetro se monitoreo la condición de humedad en el suelo utilizada en el experimento. Los tratamientos contaron con distintos regímenes de riego para generar diferentes porcentajes de humedad de suelo: T1= Testigo (agua aplicada al cultivo ocasionalmente por lluvias o riego artificial); T2 = 60% de humedad (suelo sometido a un nivel freático alto o suelo saturado con todos los espacios porosos llenos de agua); T3= 1/3 de atmósfera (capacidad de campo); T4= 15 atmósfera (punto de marchitez permanente).

**Cuadro. Característica del suelo utilizado en los dos ensayos.**

pH	N	MO	P	CiCe	K	Ca	Mg	Al	Cu	Zn	Fe	Mn	A	L	Arc
	-----%-----	mg kg <sup>-1</sup>		-----cmol (+) kg <sup>-1</sup> -----					-----mg kg <sup>-1</sup> -----					-----%-----	
6.6	0.3	1.4	24	26	0.3	19	6	0	3	6	58	46	55	29	16

El pH es en agua con una relación 1:2.5; P extraído en Mehlich 1; Laboratorio de Fertilidad de Suelos y Agua del IDIAP.

## Metodología de muestreo y

### Análisis de las muestras de suelo, plantas y variables climáticas

#### Índice de vegetación de diferencia normalizada

El índice de vegetación de diferencia normalizada (siglas en ingles NDVI) permitió determinar el contenido de clorofila en la hoja, nutrición o estado nutricional de la planta, el estado hídrico del cultivo y estimación de biomasa (Kross et al., 2015; Kumar et al., 2018). Este índice se basa en la diferencia de reflectividad entre el rojo y el infrarrojo próximo (Meneses-Tovar, 2011) la cual relaciona la información adquirida en las regiones del Rojo y NIR con el estado y características de las cubiertas vegetales, por medio de la diferencia normalizada de las dos bandas, cuyo rango de variación se encuentra entre -1 y 1 (Gilabert et al., 1997) siendo los valores más altos (0,7 a 0,8) los indicadores de plantas con mejores condiciones o las hojas verdes y saludables (Monteith y Unsworth, 2008).



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Se utilizó un GreenSeeker® (Lawton, 2008) y la ecuación siguiente, descrita por Jones et al. (2007).

$$NDVI = \frac{NIR - REDNIR}{NIR + RED}$$

Dónde: RED ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) es la radiación roja incidente sobre la superficie vegetal y NIR ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) es la radiación infrarroja cercana reflejada por ella. El GreenSeeker® utiliza diodos que emiten la luz con base en la cual se calcula el NDVI. La luz incidente natural es separada de la producida por el instrumento electrónicamente.

En el ambiente semi controlado se utilizó una casa de vegetación techada para los tratamientos de 2 a 4, y se tomaron datos de temperatura en el suelo y en la cuarta hoja del cultivo de cacao según la metodología propuesta por Puentes-Paramo et al. (2016), incluyendo el tratamiento 1. El NDVI fue determinado una vez por día (12 h, coincidiendo con el momento de mayor evapotranspiración en la plana). El suelo utilizado para el tratamiento T4 (punto de marchitez permanente) fue llevado a capacidad de campo. Después de las seis semanas se tomaron los datos de temperaturas y NDVI hasta que las plantas se marchitaron y murieran.

Los datos del experimento en ambiente semi controlado, sirvieron para construir un modelo predictivo para ubicar los datos de NDVI y humedad del cultivo cuando se tomen en ambiente natural (campo abierto).

Bajo las condiciones de ambiente natural se tomaron datos de temperatura de suelo y cultivo (NDVI) una vez por mes, durante nueve meses desde septiembre 2020 hasta mayo de 2021, coincidiendo con los meses de mayor y menor cantidad de lluvias. La temperatura del suelo y cultivo se verificaron con un termómetro infrarrojo (López-López et al., 2009). La temperatura del aire utilizada en los datos del segundo ensayo a campo abierto fue determinada con una estación meteorológica automatizada Tipo A perteneciente al IDIAP.



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



## Índice hídrico por temperatura del cultivo y suelo

El índice hídrico por temperatura ( $T_c - T_a$ ) y ( $T_s - T_a$ ) se determinó por medio de la diferencia entre la temperatura del cultivo ( $T_c$ ) y suelo ( $T_s$ ) con la temperatura del aire ( $T_a$ ). El índice de vegetación normalizada (NDVI) fue medido con un sensor portátil (GreenSeeker®) y se utilizaron las metodologías descritas por Manrique, (1999). La humedad gravimétrica en la hoja ( $H_c$ ) de acuerdo a los métodos descritos por Martínez (1971).

## Interpretación de los índices hídricos

La interpretación de los índices hídricos por temperatura para el cultivo ( $T_c - T_a$ ) y suelo ( $T_s - T_a$ ), consistió en que los valores registrados con signo positivos presentaron estrés hídrico.

Cuando una planta transpira sin estrés hídrico, la temperatura de la hoja es entre  $1^\circ$  y  $4^\circ$  C menor que la temperatura ambiental, siendo en este caso el índice de estrés hídrico del cultivo ( $T_c - T_a$ ) un valor a 0. Cuando la transpiración decrece, la temperatura de la hoja asciende y puede alcanzar de  $4^\circ$  a  $6^\circ$  C más que la temperatura del aire. En este caso, el déficit hídrico es alto, la transpiración de las hojas se ve drásticamente reducida con el incremento de la temperatura foliar; cuando la planta se marchita y muere o no transpira durante mucho tiempo, el índice de estrés hídrico es 1 (Idso, 1982).

## Características físico-química y biológica del suelo utilizado en los ensayos

Para conocer las características del suelo se tomaron muestras a profundidad de 0 a 30 cm. El pH (acidez activa) con la relación 1:2.5 (suelo-agua) se determinó con el potenciómetro utilizando técnicas descritas por Teixeira et al. (2017). El Carbono Orgánico del Suelo (COS se analizó mediante el método de Walkley y Black (1934). El N total se determinó por digestión Kjeldahl (Bremner y Mulvaney, 1983). Para la extracción de los microelementos (Cu, Fe, Zn, Mn) se utilizó el método extractor Mehlich-1.

Los cationes Ca, Mg y K se determinaron mediante extracción con una solución de KCl-1N según metodologías descritas por Teixeira et al. (2017). El Al intercambiable se determinó con la solución extractora KCl 1 M, según Díaz-Romeu y Hunter (1978). La



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

capacidad de intercambio catiónico efectivo (CICe) se determinó mediante la sumatoria de bases (Ca, Mg, K) + Al. Por otro lado, el análisis físico granulométrico de textura del suelo se realizó usando la metodología de Bouyoucos (1962) y triángulo textural USDA.

### **Toma de muestras y análisis gravimétrico en hojas de cacao**

Las hojas de las plantas se colectaron dos por cada árbol tomando la cuarta hoja próxima al ápice que está ubicada en la parte media del árbol de cacao, siguiendo la metodología recomendada por Puentes-Paramo et al. (2016). Las hojas, se llevaron a la estufa para el secado a una temperatura de 60° C hasta mantener un peso constante, que sirvió para el cálculo de la humedad gravimétrica del cultivo.

La biomasa aérea antes y después de cada ensayo en la planta de cacao se determinó mediante ecuación alométrica descrita por Andrade et al. (2008):

$$B_t = 10^{(-1.625 + 2.63 \cdot \text{Log}(d_{30}))}$$

Donde:  $B_t$ : biomasa arriba del suelo o aérea ( $\text{kg árbol}^{-1}$ ) y  $d_{30}$ : diámetro del tronco a 30 cm de altura.

Para conocer si la planta de cacao fue sometida a un estrés hídrico inducido con diferentes condiciones de humedad, se realizaron regresión lineal y gráficas de barras y comparación de medias para biomasa en los tratamientos en el ambiente semi controlado y el ambiente natural mediante la prueba Diferencia Mínima Significativa (DMS) Fisher ( $P < 0,05$ ). Los análisis estadísticos se realizaron con el software estadístico InfoStat versión 2022 (Di Rienzo et al., 2022).

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

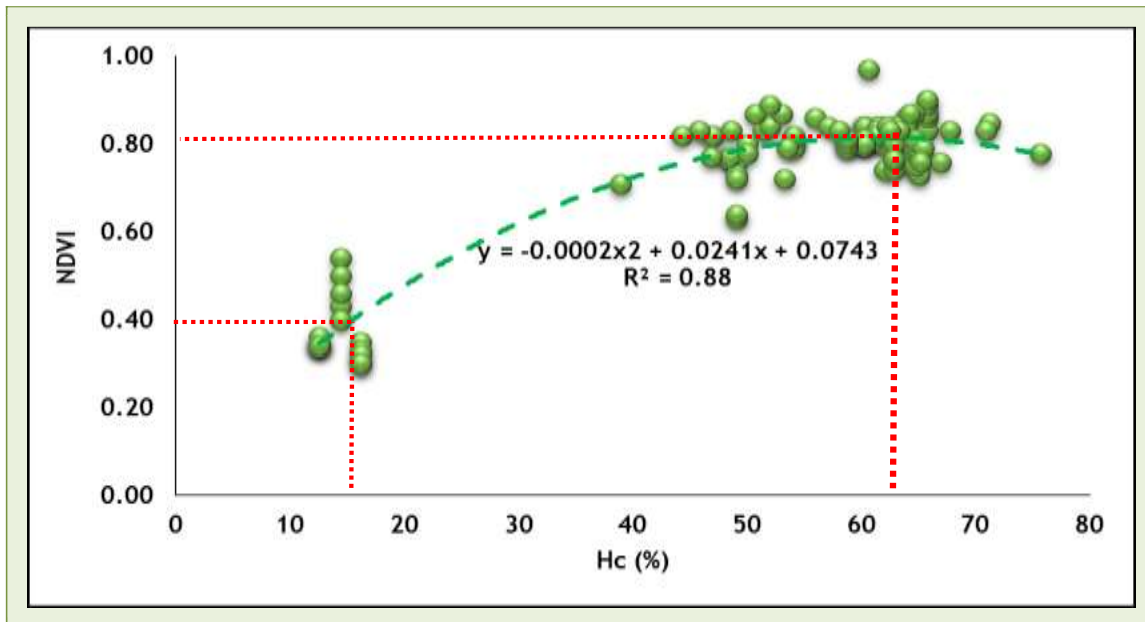
El índice de vegetación de diferencia normalizada (NVDI) se relacionó con el porcentaje de humedad del cultivo ( $H_c = \%$ ) medidos en plantas de cacao durante la etapa de crecimiento para dos ambientes distintos: casa de vegetación y a campo abierto (Figura 3).



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Se encontró que los valores menores de 20% de humedad del cultivo (Hc) presentaron un NDVI inferior de 0,40, esto indicó que las plantas sufrieron estrés hídrico. Contrario a los valores observados en la misma Figura 3, donde la curva presenta una inflexión con valores de 0,80 en NDVI y 62% de humedad del cultivo, estos valores corroboran que las plantas presentaron un buen desarrollo vegetativo sin estrés hídrico (Montheith y Unsworth, 2008).

Estudios similares descritos por Aguilar et al. (2010) y Palacio-Vélez et al. (2011), confirman que los valores de NDVI disminuyen drásticamente cuando el estrés hídrico del cultivo es mayor, pudiendo ser por clorosis en las hojas o poca biomasa.



**Figura 3. Relación entre el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y porcentaje de humedad del cultivo (Hc = %), considerando los dos ambientes seleccionados para el cultivo de cacao Clon genotipo AS-CP- 266.**

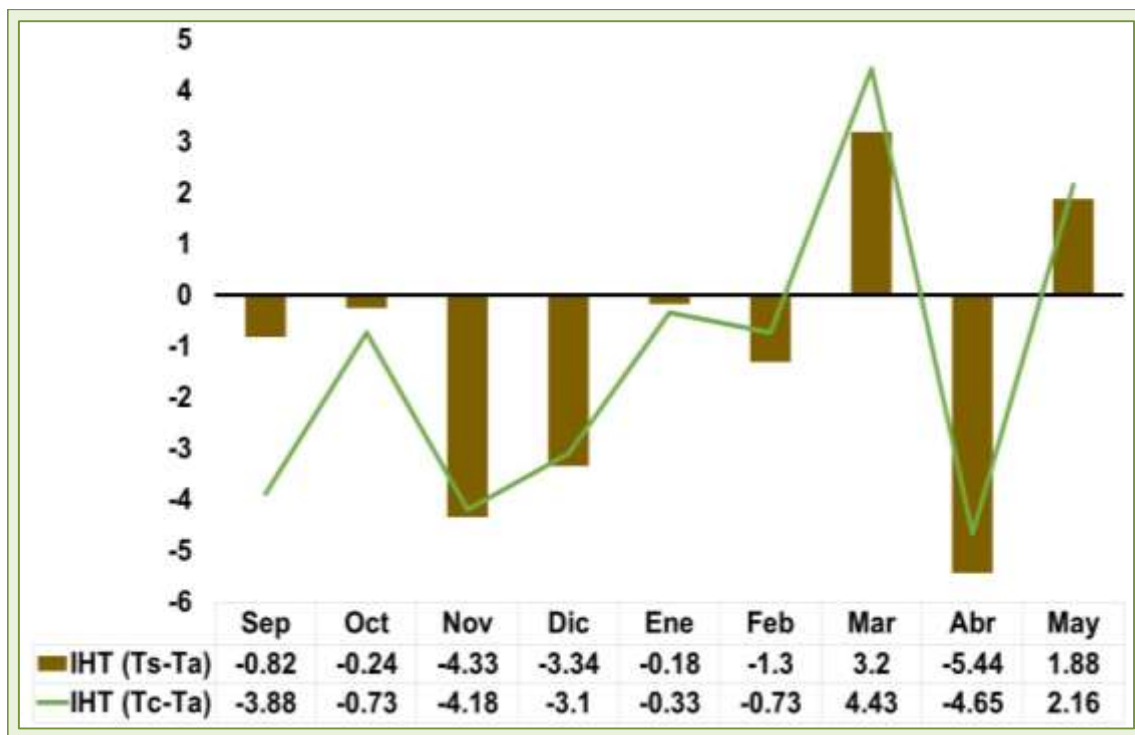
Los valores encontrados para los índices de estrés hídrico en la temperatura del suelo y del cultivo (Figura 4), pueden establecer con mayor claridad que las plantas de cacao fueron sometidas mayormente a un estrés hídrico por temperatura entre los meses de marzo y mayo según metodología de interpretación de Idso (1982), a pesar de que la lluvia en esta región alcanza un promedio anual de 2 700 mm. Esto puede indicar que la



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

lluvia no estuvo bien distribuida durante todo el año, afectando el crecimiento aéreo de la planta causado por el cierre de estomas reduciendo la fotosíntesis (Azcón-Bieto y Talon, 2008; Skirycz e Inzé, 2010).

En los demás meses evaluados (septiembre, octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero) las plantas de cacao no presentaron estrés hídrico, asumiendo entonces que las plantas mantuvieron mayor transpiración (Idso, 1982). En comparación con otros cultivos arbóreos, el cacao no tolera periodos prolongados de sequías, lo que afecta las fases vegetativas del cultivo (Raja Harun y Hardwick, 1988).



**Figura 4. Comportamiento del índice hídrico para la temperatura (IHT) del suelo y el cultivo en el ambiente natural o campo abierto en el cultivo de cacao del Clon genotipo AS-CP-2661.**

Con respecto a la biomasa aérea inicial y final en la planta de cacao, se encontraron diferencias significativas cuando fue sometida a distintos regímenes de humedad del suelo, en los experimentos en ambiente semi controlado y ambiente natural (Figura 5).



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

La prueba estadística DMS ( $P < 0,05$ ) no mostró diferencias significativas para las variables de biomasa aérea inicial en la planta de cacao cuando fue sometida a distintos regímenes de humedad del suelo en el ensayo de ambiente semi controlado.

Los valores obtenidos en el testigo para la variable biomasa aérea inicial y final fueron mayores a los valores presentados en el ambiente natural. Esto pudo deberse a que al testigo (ubicado en la casa de vegetación) se le suministró agua ocasionalmente (precipitación pluvial o riego artificial) y el ambiente natural fue interrumpido por periodos largos sin precipitación pluvial.

El tratamiento de 60% de humedad en el suelo, fue el que mayor biomasa aérea inicial y final obtuvo al compararse con los demás tratamientos evaluados.

Los valores encontrados para la variable biomasa aérea final o en el ensayo del ambiente natural fue menor en comparación con el tratamiento de 60% de humedad del suelo. Esta situación se puede explicar debido a que, en los meses de marzo a mayo en el ensayo bajo condiciones de ambiente natural, las plantas de cacao presentaron un estrés hídrico a la temperatura observada.

Estudios similares realizados en Colombia en plantas híbridas de cacao IMC 67, encontraron una relación directa entre la temperatura del suelo y de las hojas e indirecta con la humedad del suelo, concluyendo en que las hojas de cacao regularon la temperatura a 25° C, con un límite mínimo de humedad del suelo de 27% (Osorio et al., 2017).



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

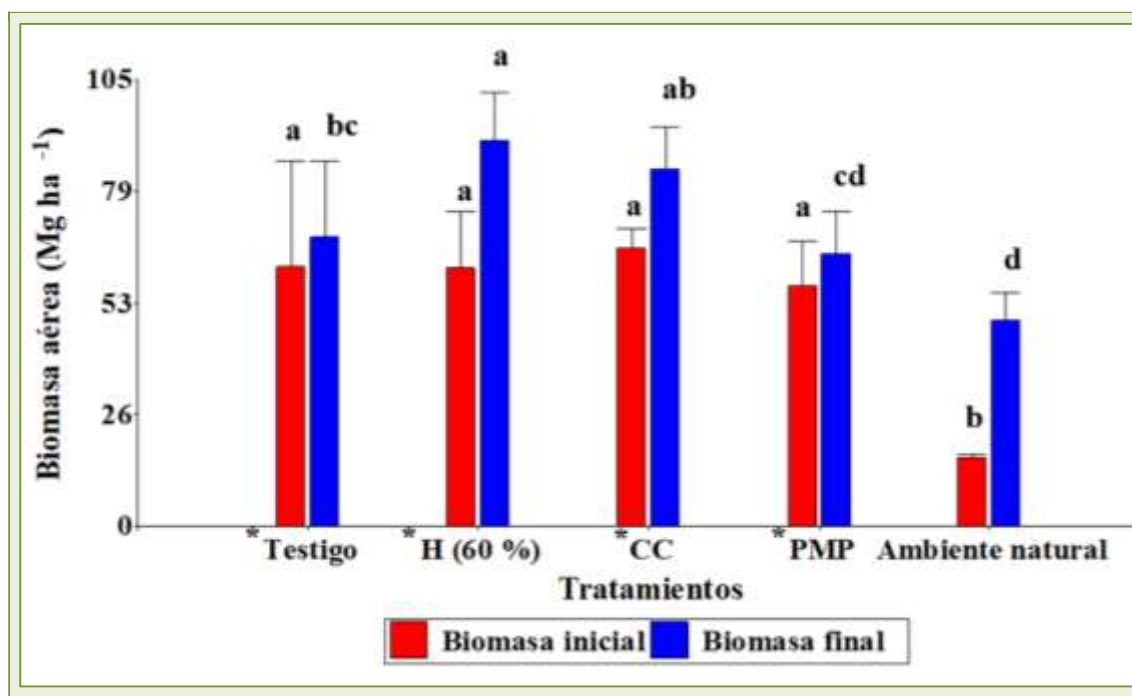


Figura 5. Comparación de la biomasa aérea inicial y final en planta de cacao cuando es sometida a distintos regímenes de humedad del suelo en ambiente semi controlado identificado con un (\*) y el ambiente natural. Ambos ensayos se realizaron con el mismo tipo y edad de planta y el mismo período. CC: capacidad de campo; PMP: punto de marchitez permanente. Letras diferentes representan no significancia estadística en la prueba LSD de Fisher ( $P < 0,05$ ).

### CONCLUSIONES

- El experimento sobre el índice de estrés hídrico en plantas de cacao bajo condiciones de ambientes semi controlado y en campo abierto realizado en Almirante, Bocas del Toro, demostró que el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), ayudó a relacionar el porcentaje de humedad del cultivo con el estrés hídrico que presentaron las plantas de cacao durante la temporada seca.
- El GreenSeeker TM demostró ser una herramienta eficaz para el monitoreo del estrés hídrico y respuesta fisiológica que las plantas de cacao ante evento de sequías, y lograr realizar los correctivos necesarios para no comprometer el rendimiento del cultivo.



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

- La disponibilidad de agua en ambiente semi controlado y el ambiente natural derivó en un efecto directo en la biomasa aérea de la planta de cacao, esto demostró que es una planta hidrófila periódica, que en casos contrarios como extremas sequías y altas temperaturas puede tener un efecto irreversible en el rendimiento.

## REFERENCIAS

- Aguilar, N., Galindo, G., Fortanelli, J., y Contreras, C. (2010). Índice normalizado de vegetación en caña de azúcar en la Huasteca Potosina. Universidad de Colima. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 14(2), 49-65.  
<https://www.redalyc.org/pdf/837/83715125003.pdf>
- Andrade, H. J., Segura, M., Somarriba, E., y Villalobos, M. (2008). Valoración biofísica y financiera de la fijación de carbono por uso del suelo en fincas cacaoteras indígenas de Talamanca, Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*, 46, 45-50.  
<https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/10054/A11506e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Azcón-Bieto, J., y Talon, M. (2008). *Fundamentos de fisiología vegetal*, segunda/Ed. Mc Graw Hill/Interamericana de España.  
<https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/FundamentosdeFisiologiaVegetal2008Azcon..pdf>
- Balasimha, D., Apshara, S.E., y Jose, C.T. (2013). 'Genotypic variations in chlorophyll fluorescence and stomatal conductance of cocoa in relation to drought tolerance', *Journal of Plantation Crops*, 41(1), 40-45.
- Bofill, P. (2022). "Aumento de la ambición en la adaptación al cambio climático en América Latina y el Caribe", Documentos de Proyectos (LC/TS.2022/7), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).  
<https://www.cepal.org/es/publicaciones/47729-aumento-la-ambicion-la-adaptacion-al-cambio-climatico-america-latina-caribe>



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method for making particle size analysis de soils. *Agronomy Journal*, 54, 464-465.

<https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>

Bremner, J. M., and S. Mulvaney C. (1983). Nitrogen total. In: Page, A. L., R. H. Miller, and D. R. Keeney (eds). *Methods of Soil Analysis. Part II. Am. Soc. Agron. No 9 in Agronomy Series. Madison, Wisconsin. USA.* pp. 595-624.

<https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c31>

Daymond, A., y Hadley, P. (2004). 'The effects of temperature and light integral on early vegetative growth and chlorophyll fluorescence of four contrasting genotypes of cacao (*Theobroma cacao* L.)', *Annals of Applied Biology*, 145(3), 257–262.

<https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2004.tb00381.x>

De Almeida, A., Brito, R. C., Aguilar, M., & Valle, R. R. (2001). Some water relations aspects of *Theobroma cacao* clones. In *Proceedings 13th International Cocoa Research Conference, Kota Kinabalu, Malaysia, October 2000.* pp. 349-363.

Díaz-Romeu, R., y Hunter, A. (1978). *Metodologías de Muestreo de suelos. Análisis químico de suelos y tejido vegetal y de Investigaciones en invernadero.* Turrialba, Costa Rica, CATIE. pp. 70. <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A4008e/A4008e.pdf>

Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M., y Robledo, C.W. (2008). *InfoStat versión (2008).* Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

[https://www.academia.utp.ac.pa/sites/default/files/docente/51/manual\\_infostat\\_esp.pdf](https://www.academia.utp.ac.pa/sites/default/files/docente/51/manual_infostat_esp.pdf)

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2016). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación: Cambio climático agricultura y seguridad alimentaria.* <https://www.fao.org/documents/card/es/c/540ee8ef-0c09-42c3-843e-4257f89c2fdb>



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



- García - Lozano, J., y Moreno – Fonseca, L. P. (2016). Respuestas fisiológicas de *Theobroma cacao* L. En etapa de vivero a la disponibilidad de agua en el suelo. *Acta Agronómica* 65(1), 44-50. <https://doi.org/10.15446/acag.v65n1.48161>.
- García - Lozano, J. (2014). *Caracterización de las respuestas fisiológicas y bioquímicas en tres clones de cacao (Theobroma cacao L.) sometidos a diferentes niveles de déficit hídrico*. Bogotá, Colombia. 56, 45. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/52256>
- Gilabert, M. A., González-Piqueras, J., y García-Haro, J. (1997). Acerca de los índices de vegetación. *Revista de Teledetección*, 8, 1-10. <http://www.aet.org.es/?q=revista8-4>
- Girolimetto, D. T. (2014). *Evaluación del estrés hídrico y de los factores que lo afectan usando información teledetectada*. Universidad Nacional del Litoral, Southern Great Plains, Estados Unidos. <http://hdl.handle.net/11185/567>
- Gutiérrez, A. (2020). Caracterización Morfológica de tres genotipos criollos promisorios de *Theobroma cacao* L. *Ciencia Agropecuaria*, (30),150-169. <http://revistacienciaagropecuaria.ac.pa/index.php/ciencia-agropecuaria/article/view/134/98>
- Herrera, D. A., Ault, T. R., Fasullo, J. T., Coats, S. J., Carrillo, C. M., Cook, B. I., y Williams, A. P. (2018). Exacerbation of the 2013–2016 pan-Caribbean drought by anthropogenic warming. *Geophysical research letters*, 45(19), 10-619. <https://doi.org/10.1029/2018GL079408>
- Idso, S. B. (1982). Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agricultural Meteorology*, 27, 59-70. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(82\)90020-6](https://doi.org/10.1016/0002-1571(82)90020-6)
- Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia. (2007). *Atlas Nacional de la República de Panamá*. Editora Novo Art., Bogotá, COL.



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

International Cocoa Organization. (2018). Mercado mundial del cacao.

Janani, P., Kumar, N., y Jegadeeswari, V. (2019). Dinámica del intercambio gaseoso y parámetros de fluorescencia de clorofila de genotipos de cacao en respuesta al déficit hídrico. *Revista de Farmacognosia y Fitoquímica*, 8 (6), 415-419.

Jones, C. N., Weckler, P. R., Maness, N. O., Jayasekara, R., Piedra, M. L., y Chrz, D. (2007). Teledetección para estimar la concentración de clorofila en espinacas utilizando reflectancia vegetal multispectral. *Transacciones de la ASABE*, 50(6), 2267-2273.

Köppen, W. (1936). Das Geographische System der Klimate en Handbuch der Klimatologie, R, Geiger. Berlín, Borntraeger, t. I, fasc. C. 44p. [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3c/Das\\_geographische\\_System\\_der\\_Klimate\\_\(1936\).pdf](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3c/Das_geographische_System_der_Klimate_(1936).pdf)

Kross, A., McNairn, H., Lapen, D., Sunohara, M., y Champagne, C. (2015). Evaluación de índices de vegetación RapidEye para la estimación del índice de área foliar y biomasa en cultivos de maíz y soja. *Revista Internacional de Observación Aplicada de la Tierra y Geoinformación*, 34, 235-248.

Kumar, V., Sharma, A., Bhardwaj, R., y Thukral, A. K. (2018). Comparación de diferentes índices de reflectancia para análisis de vegetación utilizando datos Landsat-TM. *Aplicaciones de la teledetección: sociedad y medio ambiente*, 12, 70-77.

Lau, C. H., Jarvis, A., y Ramírez, J. (2011). Agricultura Colombiana: Adaptación al Cambio Climático. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). 4p.

Lawton, K. (2008). Los sensores de cultivos alcanzan la mayoría de edad. El granjero progresista 2008:1-4.



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

López-López, R., Arteaga-Ramírez, R., Vázquez-Peña, M., López-Cruz, I., Sánchez-Cohen, I., y Ruiz-García, A. (2009). Índice de estrés hídrico del cultivo de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa Brot.*). *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 15(3), 259-267.

Martínez, M. M. (1971). *Calibración y comparación de algunos métodos para la determinación de humedad del suelo*. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.

Manrique, E. (1999). Índice de vegetación. Aplicación Delaware NDVI. Teledetección, avances y aplicaciones. Asociación Española de teledetección. pp. 217 – 219.  
<http://www.aet.org.es/congresos/viii/alb52.pdf>

Medina, V., y La liberte B. (2017). A review of research on the effects of drought and temperature stress and increased CO<sub>2</sub> on *Theobroma cacao* L., and the role of genetic diversity to address climate change. Costa Rica: Bioversity International.

Meneses-Tovar, C. L. (2011). El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Unasyva*, 238, 62(2), 39-46.

Montheith, J. L., y Unsworth, M. H. (2008). Principles of environmental physics. 3 ed. Academic Press, Boston, Estados Unidos. 418 p.

Name, B., y Cordero, A. (1987). Alternativas para uso y manejo de suelos ácidos en Panamá. In Compendio de Resultados de Investigación presentados en la Jornada Científica. Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá, Región Central, 23.

Nicols, R., Estrela, M., Valiente, J., y Barbera, M. (2010). Análisis de correlaciones entre la temperatura del aire y la temperatura de las superficies vegetadas medida con radiometría térmica. *Revista de teledetección*, 34, 36-43.



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Osorio, M. A., Leiva, E. I., y Ramírez, R. (2017). Cacao (*Theobroma cacao* L.) seedlings growth in different pot sizes. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 34(2), 4.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6223306>

Palacios-Vélez, E., Palacios-Sánchez, J., y Palacios-Sánchez, L. (2011). Agricultura de riego asistida con satélites. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2(2), 69-81.  
[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222011000200005](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222011000200005)

Peel, M. C., Finlayson, B. L., y McMahon, T. A. (2007). "Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and earth system sciences*, 11(5), 1633-1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>

Puentes-Paramo, Y. J., Menjivar-Flores, J. C., y Aranzazu-Hernandez, F. (2016). Concentration of nutrients in leaves, a tool for nutritional diagnosis in cocoa. *Agronomía Mesoamericana*, 27(2), 329-336.  
[https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S165913212016000200329&script=sci\\_abstract](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S165913212016000200329&script=sci_abstract)

Raja Harun, R. M., y Hardwick, K. (1988). The effect of different temperatures and water vapour pressure deficits on photosynthesis and transpiration of cocoa leaves. In *Proceedings of the 10th International Cocoa Research Conference* (Vol. 1987, 211-214).

Samaniego, J., Alatorre, J. E., y Van der Borght, R. (2021). Soluciones basadas en la naturaleza: el potencial de la restauración y conservación de bosques para la adaptación al cambio climático en Centroamérica.  
<https://www.cepal.org/es/publicaciones/47676-soluciones-basadas-la-naturaleza-potencial-la-restauracion-conservacion-bosques>

Skirycz, A., e Inzé, D. (2010). More from less: plant growth under limited water. *Current Opinion on Biotechnology*, 21, 197-203. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2010.03.002>



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

- Sosa, E. P., y Ramírez, G. R. G. (2020). Posibles efectos del cambio climático en la región productora de cacao en Tabasco, México. Tlalli. *Revista de Investigación en Geografía*, 3, 39-67. <https://doi.org/10.22201/ffyl.26832275e.2020.3.1069>
- Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., y Teixeira, W. G. (2017). Manual de métodos de análise do solo. 3.ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 573 p. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1085209>
- Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Servicio de Conservación de Recursos Naturales. (2014). Clave para la Taxonomía de los Suelos. 12. Ed. Texcoco, México, Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas. 374 pp. (Traducido por Carlos Alberto Ortiz-Solorio, Ma. del Carmen Gutiérrez-Castorena y Edgar V. Gutiérrez-Castorena). <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Spanish-Keys-to-Soil-Taxonomy.pdf>
- Villalaz-Pérez, J. A., Villarreal-Núñez, J. E., Santo-Pineda, A., Gutiérrez, A., y Ramos-Zachrisson, I. A. (2021). Caracterización pedogenética de los suelos dedicados al cultivo de cacao, Almirante, Bocas del Toro, Panamá. *Ciencia Agropecuaria*, (31), 37-58. <http://www.revistacienciaagropecuaria.ac.pa/index.php/ciencia-agropecuaria/article/view/299>
- Walkley, A., y Black, A. I. (1934). An examination of the method for determination soil organic matter, and a proposed codification of the chromic acid titration method. *Soil Science.*, 37, 29-38.



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)