



**OPTIMIZACIÓN DEL RIEGO EN CACAO
(*Theobroma cacao* L.) MEDIANTE LA
IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
CONTROL INTELIGENTE DE LAS
NECESIDADES HÍDRICAS DE LA PLANTA**

ESTACIÓN EXPERIMENTAL TROPICAL PICHILINGUE
Boletín Técnico No. 193



**EL NUEVO
ECUADOR**

Instituto Nacional de
Investigaciones Agropecuarias



PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA

Daniel Noboa Azín

MINISTRO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA

Danilo Palacio Márquez

DIRECTOR EJECUTIVO DEL INIAP

Raúl Jaramillo Velasteguí

AUTORES

Carrillo Zenteno Manuel Danilo

Freire Carrera Fausto

García Orellana Yelitza

Lahuathe Mendoza Braulio José

Durango Cabanilla Wuellins Dennis

Rivadeneira Moreira Betty Janet

Vera Benites Luis Fernando

Chipantiza Montaguano Álvaro

Chimarro Alvear Jorge

Lomas Arciniega Washington

Mosquera Mena Marcelo

REVISIÓN TÉCNICA

MSc. Carlos Molina H.

MSc. Ignacio Sotomayor H.

MSc. Jim Ochoa R.

FOTOGRAFÍAS

Archivo fotográfico del Departamento de Manejo de Suelos y Aguas

DISEÑO

Unidad de Comunicación Social del INIAP

Tiraje

250 unidades

ISBN

Código 978-9942-22-607-5

CITA BIBLIOGRÁFICA

Carrillo et al., 2024. Optimización del riego en cacao (*Theobroma cacao* L.) mediante la implementación de un sistema de control inteligente de las necesidades hídricas de la planta. INIAP. Boletín N° 193. pp 42.

DISTRIBUCIÓN GRATUITA

PROHIBIDA SU VENTA

La reproducción parcial o total de esta publicación, en cualquier forma y por cualquier medio mecánico o electrónico, está permitida siempre y cuando sea autorizada por los editores y se cite correctamente la fuente.



EL NUEVO
ECUADOR

Instituto Nacional de
Investigaciones Agropecuarias



CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS

1. INTRODUCCIÓN

2. METODOLOGÍA

2.1. Ubicación del experimento

2.2. Diseño del experimento

2.3. Análisis físicos y químicos de suelo

2.4. Análisis químicos de tejidos de cacao

2.5. Matriz de datos de las variables agronómicas, fisiológicas y productiva de T. cacao

2.5.1. Datos agronómicos

2.5.1.1. Datos productivos

2.5.1.2. Medidas fisiológicas

2.5.1.3. Datos meteorológicos

2.5.1.4. Manejo agronómico de la plantación

2.6. Manual del usuario del ThingsBoard

2.6.1. Interface Web

2.6.2. Tarjeta de control

2.6.2.1. Descripción del dispositivo

2.6.2.2. Especificaciones Técnicas

2.6.2.3. Características de la tarjeta de control

2.6.2.4. Componentes del dispositivo

2.6.2.5. Instalación del dispositivo de la tarjeta de control

2.6.2.6. Funcionamiento de la tarjeta de control

2.6.2.7. Mediciones

2.6.2.8. Mantenimiento

2.6.2.9. Solución de problemas

3. Resultados

3.1. Caracterización de suelos

3.1.1. Conductividad hidráulica del suelo

3.1.2. Análisis físico-químico de suelos

3.1.3. Densidad aparente del suelo

3.1.4. Densidad real del suelo

3.1.5. Porosidad del suelo

3.2. Evapotranspiración (ET_o)

3.3. Potencial hídrico foliar y tallo

3.4. Intercambio de gases

3.5. Contracción mínima del tallo

3.6. Regresiones de variables fisiológicas

4. Conclusiones

5. Referencias

FIGURAS

- Figura 1 Ubicación del sitio experimental en predios de la Hda. Clemencia
- Figura 2 a) Instalación de la estación meteorológica portátil, b) datos en la consola y c) funcionamiento de la plataforma Davis
- Figura 3 Interface de acceso al sistema de riego
- Figura 4 Autenticación e ingreso al sistema de riego
- Figura 5 Interface del sistema de riego
- Figura 6 Interface de control de las electroválvulas
- Figura 7 Visualización de los datos de los sensores de humedad por árbol y bloque
- Figura 8 Visualización de los datos de los dendrómetros por árbol y bloque evaluado
- Figura 9 Acceso a datos históricos de las medidas de los árboles y sus respectivos sensores.
- Figura 10 Selección de los distintos intervalos de tiempo (horas y días) para visualizar gráfico y tabla
- Figura 11 Selección de los distintos intervalos de tiempo para visualizar gráfico y tabla
- Figura 12 Cambio del número de Items en la tabla de datos de los sensores
- Figura 13 Cambio del número de Items en la tabla de datos de los dendrómetros
- Figura 14 Tarjeta de control para la recolección y visualización de datos en tiempo real
- Figura 15 Especificaciones técnicas del microcontrolador ESP32
- Figura 16 Sensor para medición de humedad del suelo YL-38
- Figura 17 Sensor de dendrómetro
- Figura 18 Conexión USB de la tarjeta de control
- Figura 19 Fuente de alimentación (5V DC)
- Figura 20 Módulos de los sensores de humedad
- Figura 21 Conexión del dendrómetro a la tarjeta de control
- Figura 22 A) horizontes de suelos. B) determinación de carbonatos. C) test para detección de alófanos
- Figura 23 Variación de la conductividad hidráulica de los horizontes de las calicatas 1 y 2
- Figura 24 Densidad aparente a diferentes distancias del tronco y profundidad del suelo
- Figura 25 Densidad real a diferentes distancias del tronco y profundidad del suelo
- Figura 26 Porosidad a diferentes distancias del tronco y profundidad del suelo

CUADRO

- Cuadro 1 Caracterización de suelos de la calicata 1
- Cuadro 2 Caracterización de suelos de la calicata 2
- Cuadro 3 Análisis de caracterización de los suelos de las dos calicatas en el lote experimental



AGRADECIMIENTOS

Al Fondo de Investigación para la Agrobiodiversidad, Semillas y Agricultura Sustentable (FIASA) por su apoyo financiero en el marco del proyecto FIASA-EETP-2022-017, "Optimización del riego en cacao (*Theobroma cacao* L.) mediante la implementación de un sistema de control inteligente de las necesidades hídricas de la planta".

A la empresa ECURIOLINDO en la persona de MSc. Silvia Baño, Representante Legal, por haber permitido realizar los trabajos de investigación y brindar todas las facilidades en la Hacienda Clemencia.



INTRODUCCIÓN

El cacao (*Theobroma cacao* L.) es un cultivo perenne de gran importancia económica para los países exportadores de América, África y Asia (Nair, 2021). En Ecuador las plantaciones cacaoteras ocupan más de 12% del total de tierras cultivadas, generando empleos directos de alrededor del 4% de la población económicamente activa (Neira, 2016). En 2019, la superficie agrícola dedicada al cultivo del cacao era de 601 954 ha (Avadí, 2023). Gran parte de esta producción está relacionada con monocultivos y, en menor escala, con cultivos asociados y agroforestería (Avadí, 2023).

La producción de cacao ha crecido a un ritmo promedio del 15 % anual desde 2014, principalmente gracias a las mejoras en los rendimientos (Avadí, 2023). Las variedades dominantes son «Cacao Fino y de Aroma» y CCN-51, y la mayor parte de la producción se ubica en la costa ecuatoriana (Avadí, 2023). Los ingresos por la venta de cacao varían según el tipo de producto: el chocolate puede alcanzar los 14 510 USD/t, mientras que los granos fermentados y secos oscilan entre 2100 y 4200 USD/t (Avadí, 2023).

A pesar de la importancia del cultivo de cacao por ser una fuente significativa de ingresos para pequeños agricultores, son muchas las interrogantes que se tienen del funcionamiento del árbol de cacao y su respuesta a condiciones de estrés hídrico, al cambio climático, a efectos de los nutrientes y fenología. Hasta el momento. En la actualidad no se dispone de herramientas de apoyo para la toma de decisiones en cuanto a sus principales prácticas agrícolas, como el riego, la fertilización y la poda (Tosto et al., 2023).

Se estima que en los países latinoamericanos aumenten las necesidades de riego de los cultivos perennes como consecuencia del cambio climático, afectando la disponibilidad de agua en las próximas décadas, acrecentando así las necesidades de los cultivos (Borja et al., 2017), por lo cual será indispensable el uso de tecnología para aumentar la eficiencia de los regadíos, obligando a los productores a la adopción de prácticas agrícolas que lleven a un modelo sostenible para la producción de cacao (Moreno-Miranda et al., 2020). Lamentablemente los cacaocultores del Ecuador, están poco preparados para la adopción de técnicas para hacer frente a los cambios en los regímenes de lluvias, producto del cambio climático (Idawati et al., 2024).

Un estudio realizado por Ortiz-Bobea et al. (2021), afirma que desde 1961 se ha producido una reducción de la productividad agrícola ~26-34% por efecto del cambio climático antropogénico (ACC) en regiones más cálidas como África, América Latina y el Caribe, por ello se hace indispensable la adopción de tecnologías de riego que ayuden a disminuir el impacto en la producción de los cultivos por efecto del cambio climático, al reducir la proporción de rendimiento marcadas por una fuerte variabilidad climática, caracterizada por temperaturas altas, disminución de las precipitaciones y estaciones lluviosas más cortas (Cavazza et al., 2018).

La escasez de agua en el suelo ocasiona en las plantas de cacao problemas morfológicos (reducción del desarrollo radicular, foliar, vigor de la planta), fisiológicos (reducción de la actividad fotosintética, densidad estomática, clorofila, potencial hídrico), bioquímicos (reducción de superóxido dismutasa, catalasa, ascorbato peroxidasa, incremento del etileno), químicos (reducción de macro y microelementos) (Janani et al., 2019; Alban et al., 2016).



Está comprobado que existe una alta correlación entre el potencial hídrico del suelo, el potencial hídrico de la planta y la conductancia estomática (Centeno et al., 2010). El parámetro más usado como indicador del estado hídrico de las plantas y momento de riego es el potencial hídrico (Barbagallo et al., 2021), pero es una medida difícil de registrar, pues requiere de equipos y de mano de obra especializada, adicionalmente es una medida puntual; por ello que se hace necesario contar con un indicador de naturaleza dinámica, para la elaboración de programas de riego, que debe estar estrechamente relacionado con las condiciones climáticas y del suelo; mediante la medición de las fluctuaciones del diámetro del tronco se puede obtener información de forma continua y automática, detectando de forma inmediata la aparición de una situación de déficit hídrico (Goldhamer et al., 1999; Ortuño et al., 2009).

Existe un auge significativo en el desarrollo de nuevas técnicas que permitan evaluar el estado hídrico de las plantas de manera directa, continua y en tiempo real, que buscan mejorar la gestión del riego, aumentar la eficiencia del uso del agua, produciendo mejores alimentos a un menor costo ambiental (Velasco-Muñoz et al., 2019).

En este sentido, se han realizado avances con los parámetros derivados de las variaciones micrométricas del diámetro de los troncos como indicadores del estado hídrico de las plantas ha sido probado en diversos cultivos perennes como melocotonero (Conejero et al., 2010; Mirás-Avalos et al., 2017), uva (Zhang et al., 2021), limonero (García-Orellana et al., 2007), olivo, (Morianana et al., 2011, Girón et al., 2016), almendro (Puerto et al., 2013), ciruelo (Paltineanu et al., 2020), etc.

Con base a lo anterior, el objetivo de esta investigación fue determinar la existencia de relación entre la fluctuación del diámetro de tronco y el estado hídrico de los árboles adultos de cacao, mediante (1) la evaluación del comportamiento de variables fisiológicas de árboles adultos de cacao, (2) la correlación de las variables fisiológicas con parámetros meteorológicos, y (3) la correlación entre el potencial hídrico (foliar y tallo) con la máxima contracción de diámetro de tallo (MCDT).

METODOLOGÍA

2.1. Ubicación del experimento

Se encuentra ubicado en la Hda. Clemencia, cantón Balzar, provincia del Guayas, con coordenadas geográficas de $1^{\circ}9'59.24''$ S y $79^{\circ}44'23.13''$ O, a 63 msnm (Figura 1), de propiedad de la Empresa "ECURIOLINDO".

2.2. Diseño del experimento

El factor en estudio en la investigación, corresponde a láminas de riego, por sistema de goteo, en porcentajes de 0 (Testigo absoluto), 50, 75, 100 y 125 % del óptimo (2500 mm/año), que corresponden a los tratamientos.

Las parcelas se encuentran distribuidas en campo, siguiendo el diseño de bloques completos al azar, con cuatro repeticiones. Para la comparación de promedios se utilizó la prueba de Tukey al 5%.



Figura 1. Ubicación del sitio experimental en predios de la Hda. Clemencia.



2.3. Análisis físicos y químicos de suelo

Se colectaron 10 submuestras de suelos en zig-zag para completar una muestra compuesta por parcela experimental y realizar su análisis respectivo en el laboratorio. El contenido de macro y micro nutrientes, materia orgánica (MO) y textura del suelo, se determinó siguiendo la metodología establecida por el laboratorio de análisis de suelo del INIAP (Mite et al., 2001). La solución extractante utilizada fue Olsen modificado, el análisis de N y P se realizó por el método colorimétrico; el K, Ca, Mg, Zn, Cu, Fe y Mn se analizó mediante absorción atómica; para S se usó el método turbidimétrico con fosfato monobásico de calcio y B mediante el método colorimétrico de la curcumina; la conductividad eléctrica se determinó usando la metodología de pasta saturada (suelo:agua 1:2.5) y la capacidad de intercambio catiónico usando cloruro de bario.

Se realizaron dos calicatas y se caracterizaron en campo los horizontes Ap, A1, B1 y B2, y se analizaron los parámetros físicos del suelo como densidad del suelo, real, porosidad, conductividad hidráulica, capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP).

2.4. Análisis químicos de tejidos de cacao

Al inicio de la investigación se colectaron hojas (tercera contando desde la punta de la rama ubicada en tercio medio de la planta), tomado 20 submuestras que fueron llevadas al laboratorio para realizar los análisis químicos de macro y micro nutrientes utilizando la metodología de digestión húmeda con ácido nítrico - perclórico y micro Kjeldahl, utilizada en el Laboratorio de Suelos y Aguas del INIAP.

2.5. Matriz de datos de las variables agronómicas, fisiológicas y productiva de T. cacao

En la investigación se registraron datos desde el 22 de julio hasta el 31 de octubre del 2024, utilizando las plantas útiles, ubicadas en el interior de cada parcela experimental.

2.5.1. Datos agronómicos

Longitud y diámetro de mazorca (cm): Con la ayuda de un calibrador o vernier, en 10 mazorcas tomadas al azar, se midió el diámetro en el tercio medio de la mazorca y con una cinta métrica su longitud, desde el pedúnculo hasta el pico de la mazorca (Ramírez et al., 2020).

Ancho y longitud de almendra: En 100 granos secos, tomados al azar, se midió el largo y ancho de almendra, utilizando un calibrador o vernier digital (Graziani et al., 2002).

2.5.1.1. Datos productivos

Número de mazorcas sanas: Se contabilizó el número total de mazorcas fisiológicamente maduras y sanas por árbol, en función del pico de producción y frecuencia de cosecha (Loor et al., 2016).

Peso de cacao fresco por planta: Se registró el peso total de granos de cacao fresco por árbol (Loor et al., 2016).

Las siguientes variables se midieron en el pico de producción.

Índice de mazorca (IM): Viene dado por el número de mazorcas necesarias para obtener 1 kg de cacao fermentado y seco. Para esto se contabilizó el número de mazorcas maduras y sanas, además del peso de las almendras fermentadas y secas, siguiendo los protocolos descritos por Jiménez et al., (2016), para luego aplicar la siguiente fórmula (Loor et al., 2016):

$$IM = (\text{Número de mazorcas} \times 1000) / (\text{Peso (g) de almendras secas})$$

Índice de almendra (IS): Se define como el peso promedio de gramos de 100 almendras fermentadas y secas. Para esto, se tomaron al azar 100 almendras y se pesaron en una balanza analítica OHAUS, con tres casas decimales (Loor et al., 2016) y para el cálculo, se empleó la formula siguiente.

$$IM = \text{Peso (g) 100 almendras} / 100$$

2.5.1.2. Medidas fisiológicas

Potencial hídrico foliar al mediodía solar (Ψ_{md}): se midió dos veces por semana, en un árbol por tratamiento, en dos hojas maduras por planta expuestas al sol, usando una cámara de presión Scholander (PMS INSTRUMENT COMPANY).

El potencial hídrico del tallo (Ψ_{tallo}) al mediodía solar: se midió dos veces por semana en 3 3 3 3 dos hojas maduras, cercanas al tronco, por planta, las cuales se cubrieron con papel de aluminio dos horas previo al registro de las medidas con la cámara de presión Scholander (PMS INSTRUMENT COMPANY).

La conductancia foliar (g_f) y la fotosíntesis neta (P_n): se midieron dos veces por semana, al mediodía, desde el día del año (DA) 173 al 306, en un número y tipo de hojas similar al utilizado para las medidas de Ψ_{md} , usando un medidor de fotosíntesis portátil IRGA LCPro.



2.5.1.3. Datos meteorológicos

Se instaló la estación meteorológica y los datos de precipitación, humedad relativa, temperatura máxima, mínima y media etc. fueron recopilados diariamente. A partir del 25 de julio, se instaló un Wireless que permitió la traspolución de información de los datos meteorológicos a la plataforma virtual de Davis, cada 15 minutos (Figura 2).



Figura 2. a) Instalación de la estación meteorológica portátil, b) datos en la consola y c) funcionamiento de la plataforma Davis.

2.5.1.4. Manejo agronómico de la plantación

La plantación de cacao fue establecida en el año 2001, con el material genético CCN-51. Durante el tiempo de duración de la investigación ha recibido anualmente podas de mantenimiento en los meses de enero y junio. El control de malezas se realizó con dos aplicaciones de Glufosinato de amonio (1 l/ha) y tres controles mecánicos con desbrozadoras. Las aplicaciones de fungicidas se realizaron en los meses de marzo y Julio utilizando entre 1 y 0,5 l/ha de fosfito de cobre, respectivamente.

Para manejo de insectos-plaga, se aplicó (Lenuferon 50 g/L) 0,4 l/ha y la fertilización fue edáfica en el mes de marzo y octubre en cantidades de (kg/ha): 29,33 sulfato de amonio; 11 de fosfato mono amónico; 73,31 de muriato de potasio; 14,66 de sulfato magnesio; 16,69 de sulfato de magnesio; 7,33 de ácido bórico; 9,53 de sulfato de zinc.

2.6. Manual del usuario del ThingsBoard

El sistema de riego inteligente permite de forma automática detectar el estrés hídrico de las plantas de cacao, mediante una red de sensores colocados en las raíces y en los troncos de los árboles, una vez detectado la necesidad de riego, activa las electroválvulas que permiten suministrar agua a las plantas.

A continuación, se explica el paso a paso para poder ingresar en el sistema ThingsBoard que controla el sistema de riego, basado en la información que llegará desde el campo.

2.6.1. Interface Web

Para acceder al Sistema de riego es necesario utilizar un navegador Web y colocar el nombre del servidor (<http://piu.ute.edu.ec:8080>), lugar donde está alojado el Sistema de riego como se aprecia en la Figura 3.

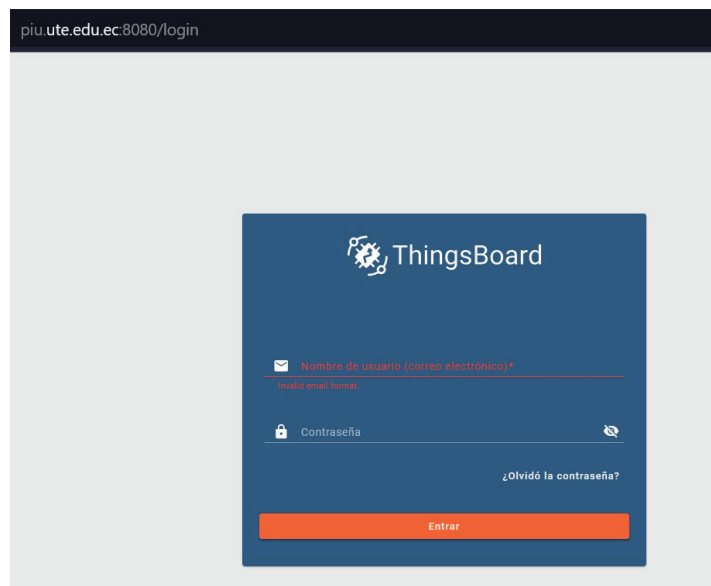


Figura 3. Interface de acceso al sistema de riego.

Una vez que se recibe respuesta del servidor según se observa en la Figura 4, es necesario identificarse con una cuenta de usuario y contraseña.

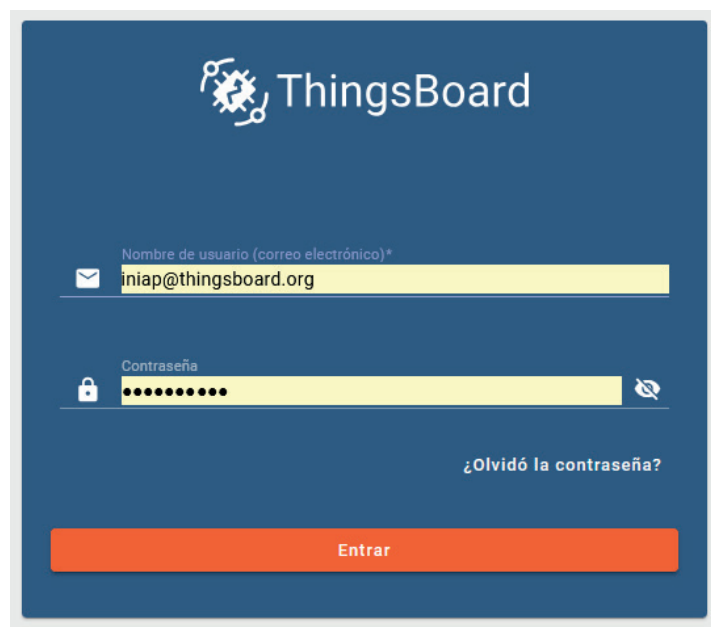


Figura 4. Autenticación e ingreso al sistema de riego.



Pasada la fase de autenticación, se carga la siguiente ventana del Sistema de riego, con opciones de navegación habilitadas conforme los permisos de acceso del usuario, en la Figura 5, parte superior izquierda se selecciona **Paneles** para visualizar los bloques y árboles configurados.

Fecha de creación ↓	Título	
2024-07-19 15:14:27	Electroválvulas	
2024-07-19 10:51:35	Bloque D Árbol D_5	
2024-07-19 10:51:09	Bloque D Árbol D_4	
2024-07-19 10:50:42	Bloque D Árbol D_3	
2024-07-19 10:50:14	Bloque D Árbol D_2	
2024-07-19 10:49:36	Bloque D Árbol D_1	
2024-07-19 10:16:05	Bloque C Árbol C_5	
2024-07-19 10:15:10	Bloque C Árbol C_4	
2024-07-19 10:14:42	Bloque C Árbol C_3	
2024-07-19 10:14:05	Bloque C Árbol C_2	

Figura 5. Interface del sistema de riego.

Al seleccionar el **Panel Electroválvulas**, se accede a la interface de control de las cuatro electroválvulas que suministran de agua en el Sistema de riego.

Las electroválvulas se abren o cierran mediante un deslizador, el cual se acciona desde un computador durante las horas de riego suministrado en la hacienda (Figura 6).



Figura 6. Interface de control de las electroválvulas.

Al seleccionar un Bloque en la plataforma del ThinsBoard, se accede a los sensores de humedad y dendrómetros instalados en los árboles que corresponden a dicho Bloque.

En caso del árbol 4 del bloque D, se aprecia las medidas de humedad correspondientes a los cuatro sensores que están colocados en diferentes profundidades (10, 20, 40 y 50 cm), los datos se presentan en gráficas y tabla, de cada árbol y bloque evaluado (Figura 7).

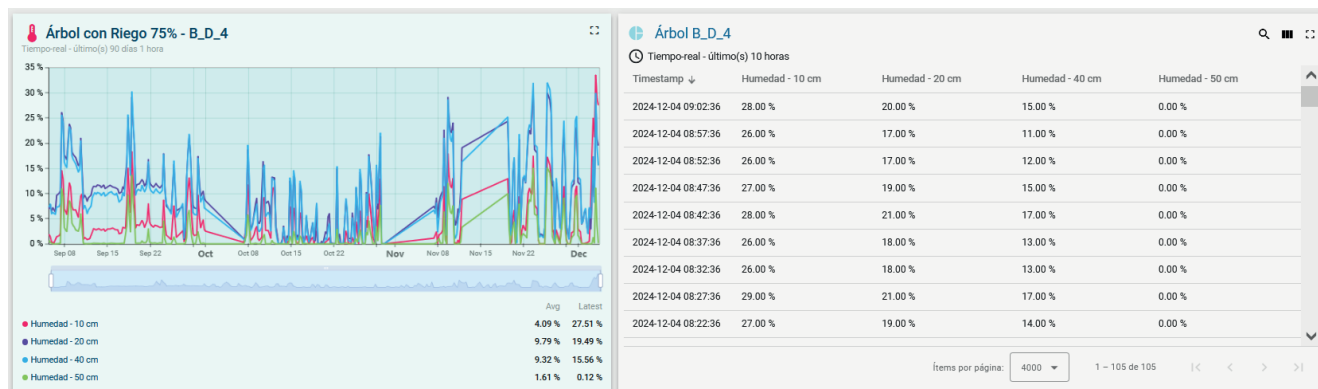


Figura 7. Visualización de los datos de los sensores de humedad por árbol y bloque.

En la Figura 8, de igual manera es posible acceder a los datos del Dendrómetro colocado en el árbol (B_D_4), en dos formatos, gráfico y tabla. Aquí se aprecia la contracción de los árboles según las condiciones del clima.

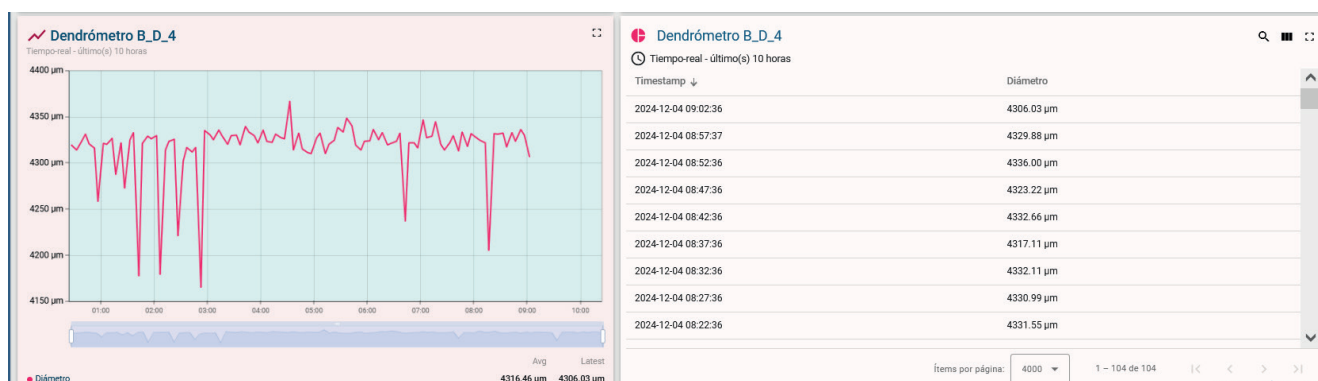


Figura 8. Visualización de los datos de los dendrómetros por árbol y bloque evaluado.



Para acceder a datos históricos de las medidas de los árboles y sus respectivos sensores, es necesario cambiar el tiempo de visualización (flecha roja), esto se realiza en la parte superior de cada gráfico y/o tabla con el objetivo de verificar o descargar la información que amerite (Figura 9).

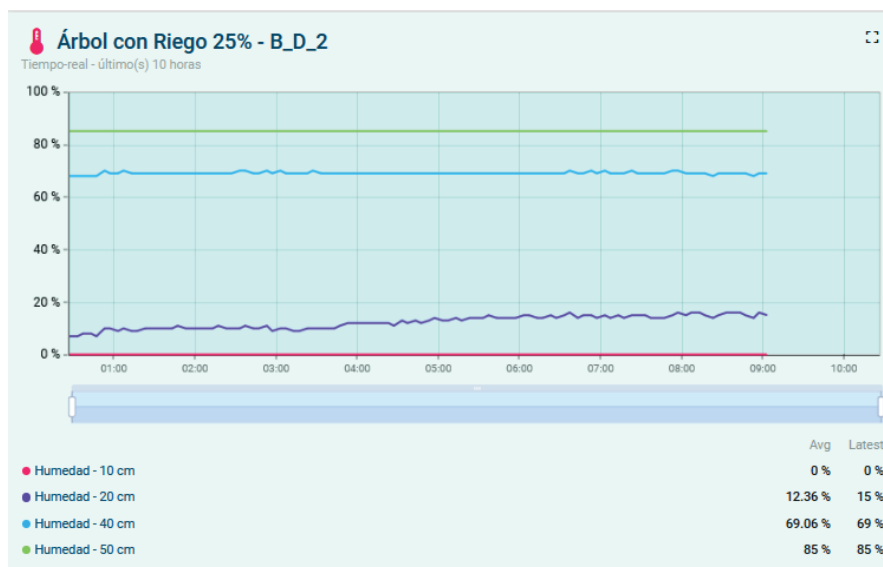


Figura 9. Acceso a datos históricos de las medidas de los árboles y sus respectivos sensores.

El Sistema permite realizar la selección de diferentes intervalos de tiempo (5, 10 y 12 horas; 1, 7 y 30 días) para visualizar sus datos en los gráficos y las tablas procediendo de la siguiente manera (Figura 10).



Figura 10. Elección de los distintos intervalos de tiempo (horas y días) para visualizar gráfico y tabla.

Un ejemplo de visualización en el Sistema de riego de los datos promedio con intervalos de 2 h en los sensores de humedad correspondientes a los últimos 30 días, se presentan en la figura 11.

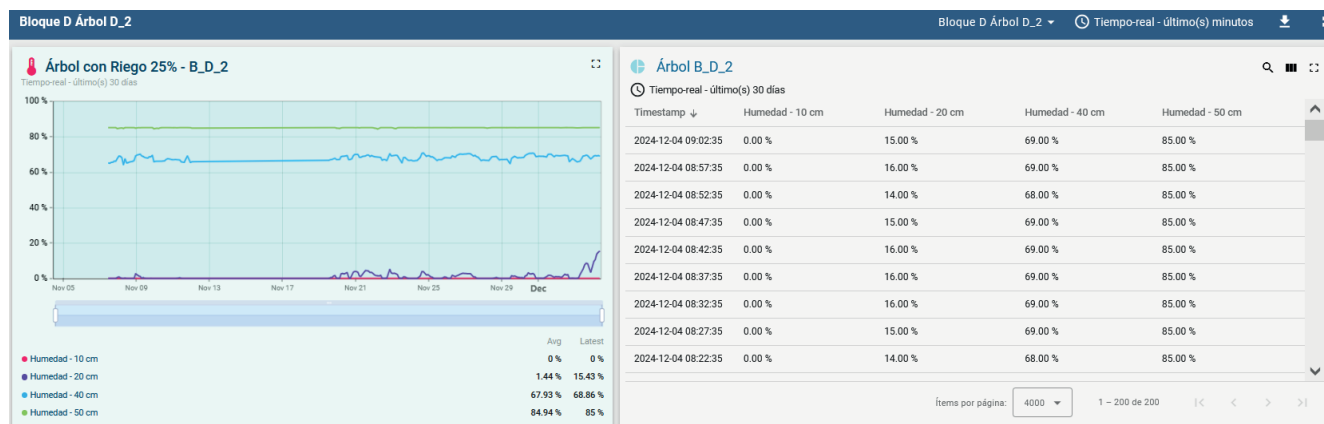


Figura 11. Selección de los distintos intervalos de tiempo para visualizar gráfico y tabla.

Por defecto en la tabla se visualiza únicamente 10 items, para cambiar es necesario seleccionar un número mayor de filas, mediante la correspondiente lista desplegable (Figura 12).

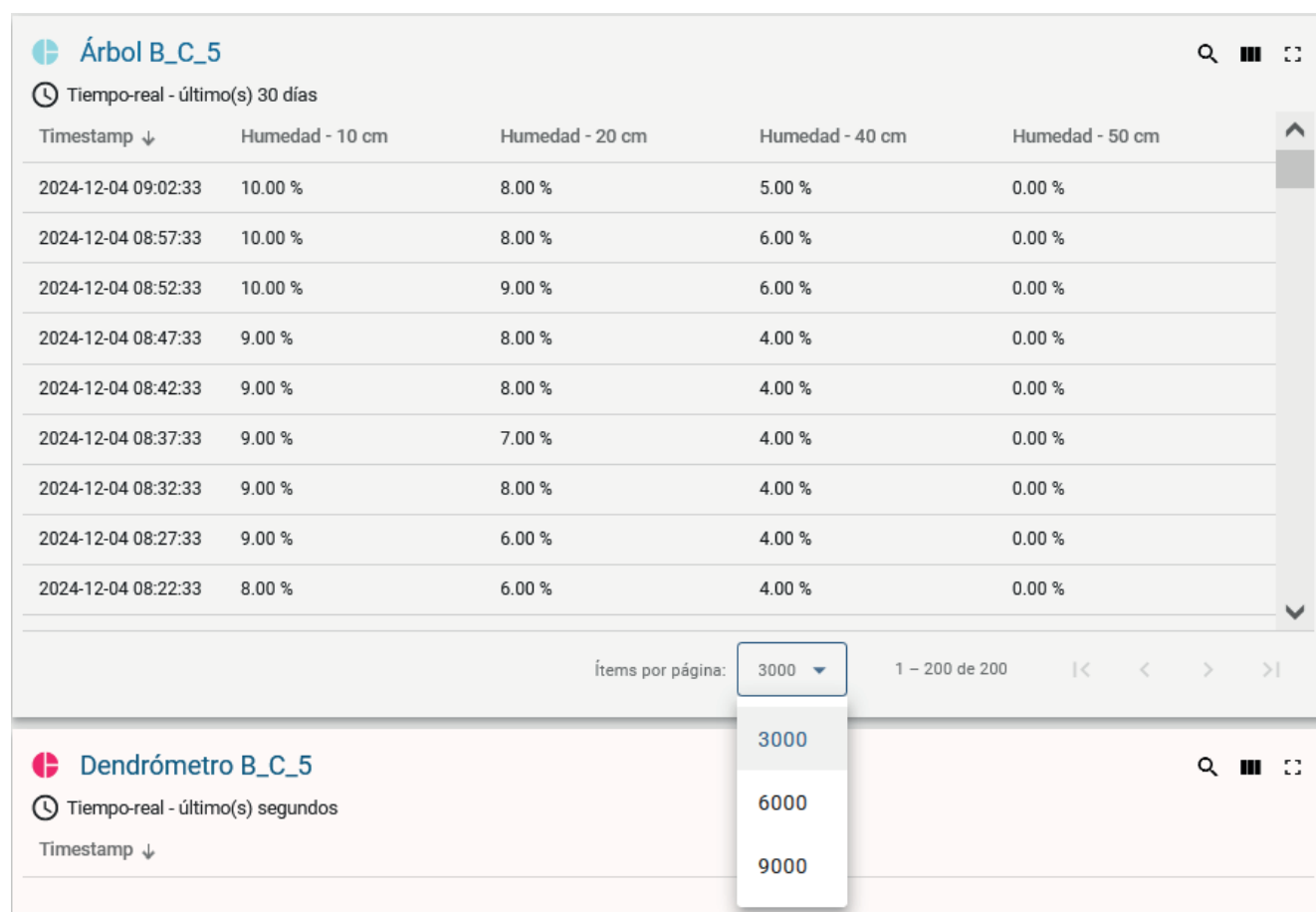


Figura 12. Cambio del número de Items en la tabla de datos de los sensores.



Para los dendrómetros el procedimiento es similar al aplicado a los sensores de humedad (Figura 13).

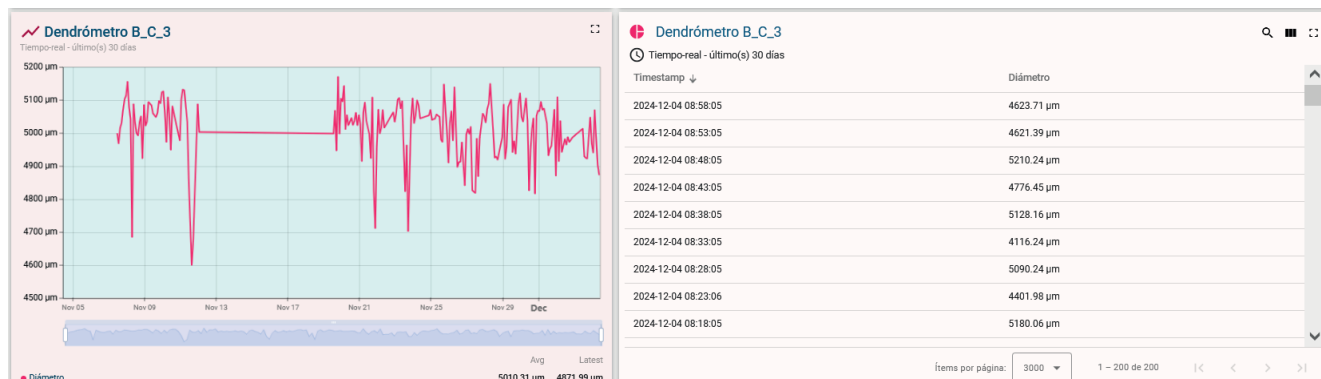


Figura 13. Cambio del número de Items en la tabla de datos de los dendrómetros.

2.6.2. Tarjeta de control

2.6.2.1. Descripción del dispositivo

La tarjeta de control fue diseñada para la recolección de datos de humedad del suelo y la fluctuación del diámetro del árbol de cacao, incorporando cuatro entradas analógicas que permiten conectar sensores de humedad del suelo.

Estos sensores utilizan electrodos para enviar señales que representan los niveles de humedad, facilitando un monitoreo preciso y continuo (Figura 14).

Además, se colocó una entrada analógica que permite conectar un sensor dendrómetro, el cual mide la expansión del tronco de las plantas, brindando información adicional sobre su crecimiento y estado hídrico.

La tarjeta de control fue equipada con un módulo ESP32, el cual permite la conexión a redes Wi-Fi y Bluetooth, lo que facilita la recolección y visualización de datos en tiempo real, ya sea en red local o a través de Internet. La tarjeta incluye cinco entradas analógicas en total y funciona con una fuente de alimentación de 5V DC, asegurando un rendimiento eficiente y estable.

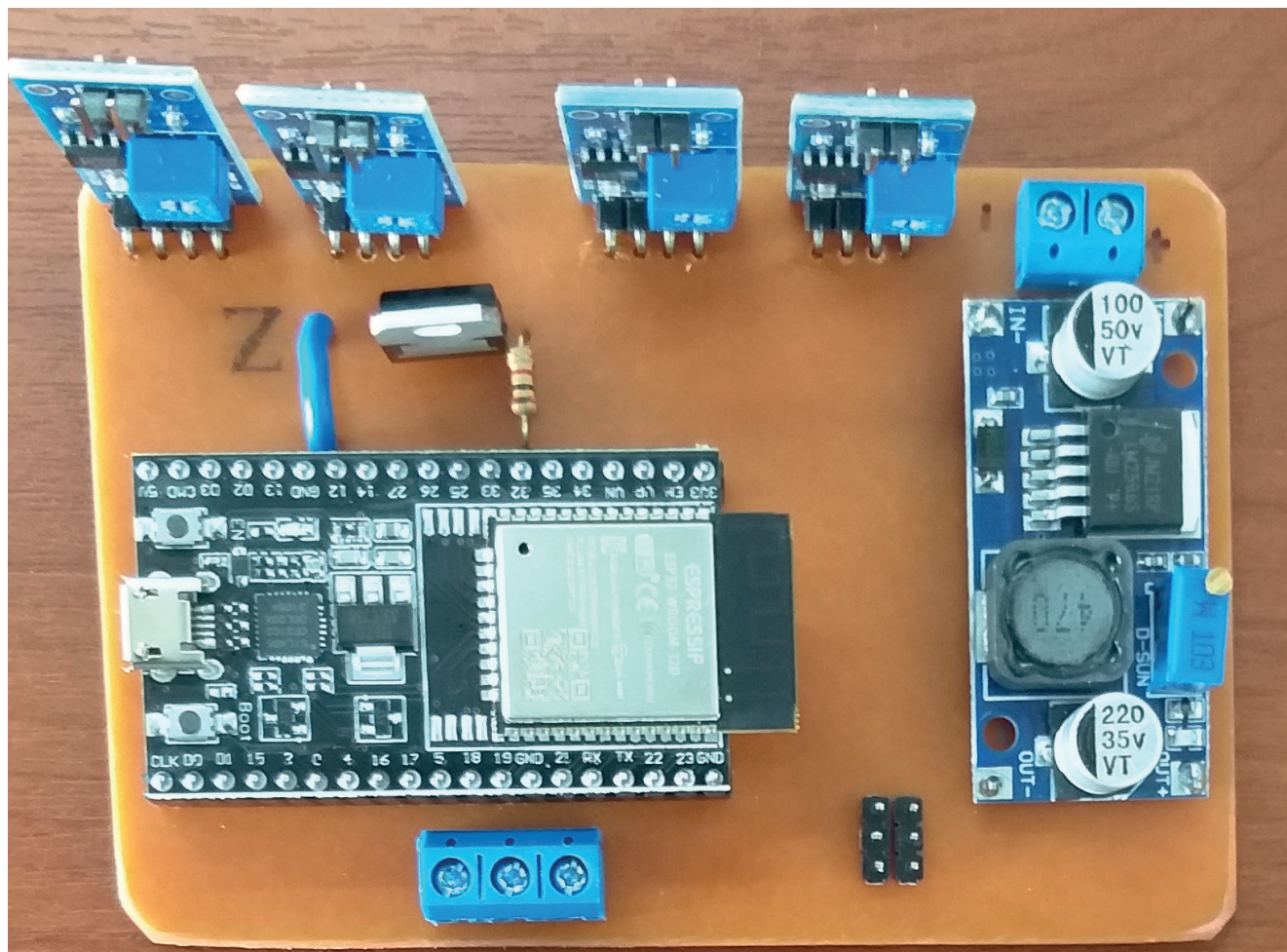


Figura 14. Tarjeta de control para la recolección y visualización de datos en tiempo real.



2.6.2.2. Especificaciones Técnicas

En la figura 15 se observan las especificaciones técnicas de la tarjeta de control:

- Microcontrolador: ESP32
- Fuente de Alimentación: 5V a través de un adaptador USB o batería externa
- Entradas Analógicas:
 - Pin GPIO VP 36 - (Sensor de Humedad N° 4)
 - Pin GPIO VN 39 - (Sensor de Humedad N° 3)
 - Pin GPIO 34 - (Sensor de Humedad N° 2)
 - Pin GPIO 35 - (Sensor de Humedad N° 2)
 - Pin GPIO 33 - (Dendrómetro N° 4)

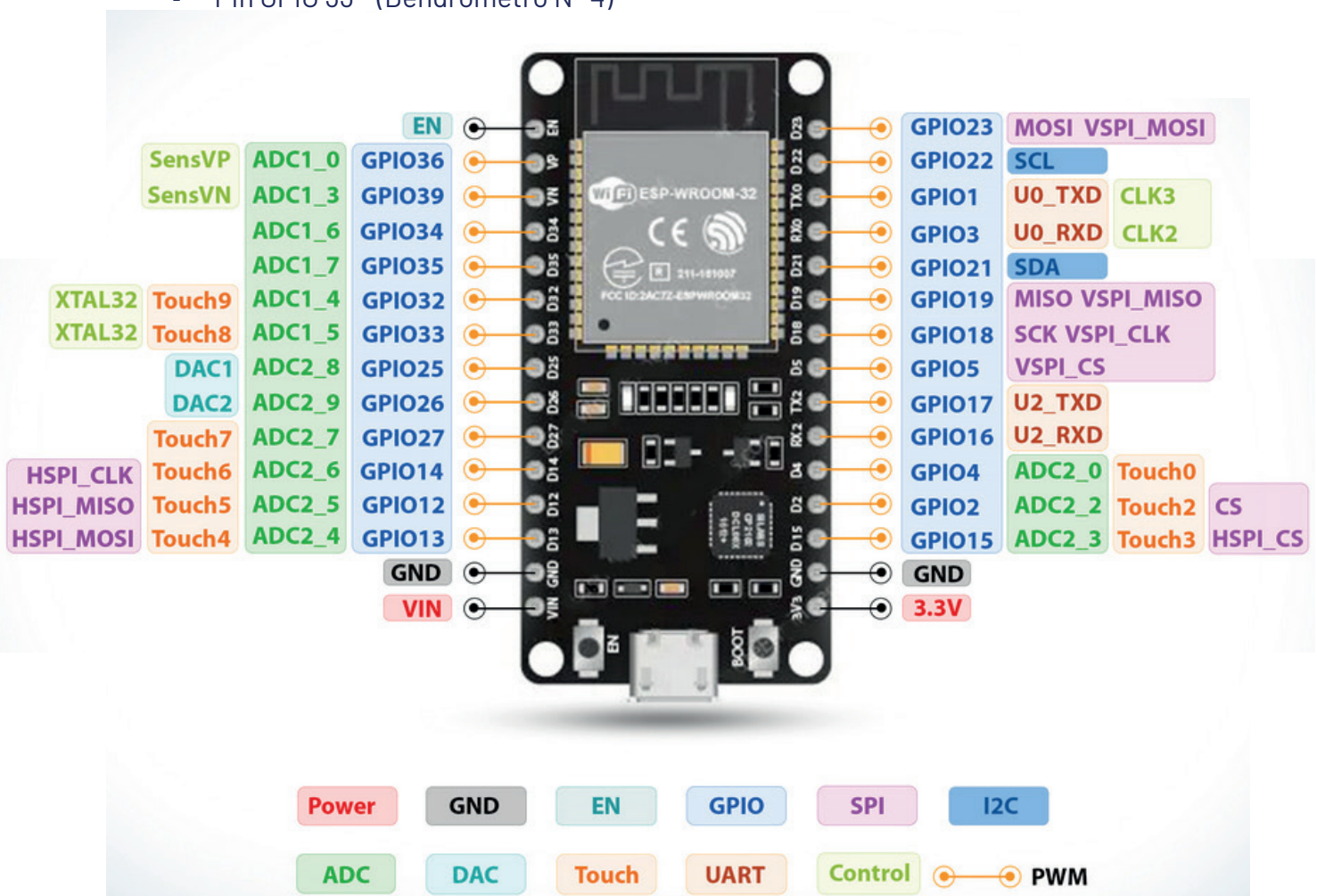


Figura 15. Especificaciones técnicas del microcontrolador ESP32.

2.6.2.3. Características de la tarjeta de control

- a. **Entradas Analógicas:** Utiliza los pines analógicos (ADC) de la ESP32 (GPIO) para la recopilación de datos. Cada pin puede leer voltajes de 0 a 3,3V, proporcionando valores digitales entre 0 y 4095.
- b. **Recopilación de Datos:** Se implementa un bucle en el código para leer periódicamente los valores analógicos de cada uno de los pines configurados. Los datos se almacenan en un array o se envían directamente para su procesamiento a la nube.
- c. **Conexión Wi-Fi:** Configura la ESP32 para conectarse a una red Wi-Fi. Se pueden utilizar bibliotecas como WiFi.h para gestionar la conexión. Los datos recopilados se envían a un servidor en la nube o a una base de datos utilizando protocolos como HTTP o MQTT.
- d. **Conexión Bluetooth:** Se habilita Bluetooth para la comunicación con dispositivos cercanos, pudiendo utilizar la biblioteca BluetoothSerial.h para enviar datos a través de un puerto serial Bluetooth. Permite la visualización de datos en tiempo real a través de aplicaciones como Serial Bluetooth Terminal en un Smartphone.
- e. **Visualización de datos:** Los datos enviados por Wi-Fi y Bluetooth se pueden visualizar en el monitor serie del IDE de Arduino, mostrando tanto los valores leídos como las confirmaciones de envío.
- f. **Fuente de alimentación:** Se puede alimentar la ESP32 con un adaptador USB de 5V o utilizar baterías externas. Es importante asegurarse de que la fuente de alimentación pueda proporcionar suficiente corriente (mínimo 500 mA) por árbol, para el funcionamiento del módulo y los periféricos conectados.

2.6.2.4. Componentes del dispositivo

a) Lectura del sensor de humedad

La tarjeta de control dispone de cuatro entradas analógicas para la conexión de sensores, permitiendo un monitoreo eficiente de las condiciones de humedad del suelo. Cada entrada está diseñada para aceptar un sensor, que proporciona lecturas precisas de la humedad en porcentaje (Figura 16).

- **Rango de medición:** 0% a 100% de humedad del suelo.
- **Tipo de sensor compatible:** Sensores de humedad resistivo.

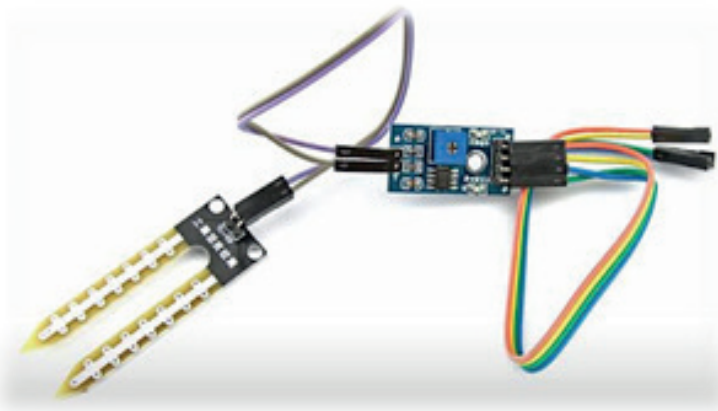


Figura 16. Sensor para medición de humedad del suelo YL-38.



a) Lectura del sensor dendrómetro

En la figura 17, se observa que los dendrómetros admiten obtener datos de expansión y contracción del tallo del árbol, permitiendo un monitoreo eficiente. Está diseñado para aceptar un sensor de efecto Hall, que proporciona lecturas precisas.

- **Rango de medición:** 0 a 10000 mm.
- **Tipo de sensor compatible:** Sensor de efecto Hall.



Figura 17. Sensor de dendrómetro.

2.6.2.5 Instalación del dispositivo de la tarjeta de control

La instalación del dispositivo requiere seguir varios pasos para asegurar su correcto funcionamiento. A continuación, se detalla el proceso:

a) Conexión de la entrada USB:

Conectar el cable a la entrada USB de la tarjeta ESP (Figura 18) Esto permitirá la transferencia de datos y la carga del programa desarrollado. Asegurarse que el otro extremo del cable esté conectado a un puerto USB de la computadora (Figura 18).

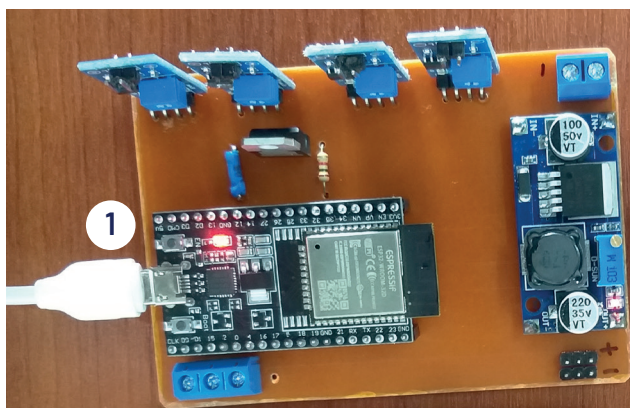


Figura 18. Conexión USB de la tarjeta de control.

a) Fuente de alimentación (5V DC):

Conectar la fuente de alimentación de 5V DC al conector de alimentación del dispositivo. Verificar que la fuente esté adecuadamente configurada y que el voltaje de salida sea el correcto para evitar daños al dispositivo (Figura 19).

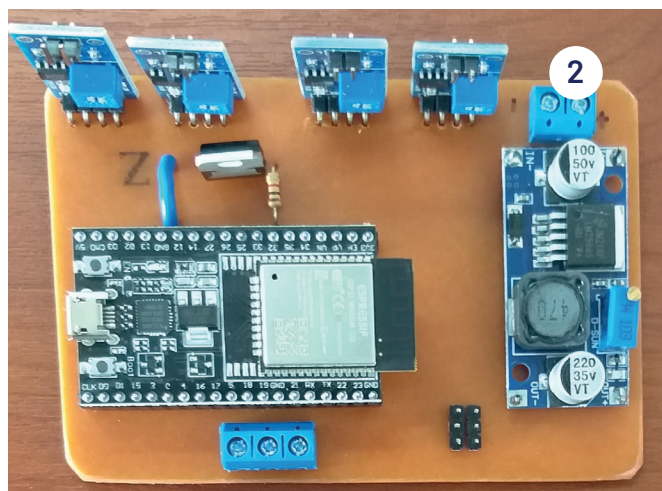


Figura 19. Fuente de alimentación (5V DC).

a) Módulos de Sensores:

Los cuatro módulos de sensores de humedad deben ser conectados a las entradas analógicas del dispositivo, asegurando que cada sensor esté correctamente identificado y conectado a la entrada correspondiente para facilitar la recolección de datos. Adicionalmente, se debe verificar las conexiones eléctricas para asegurar un buen funcionamiento (Figura 20).

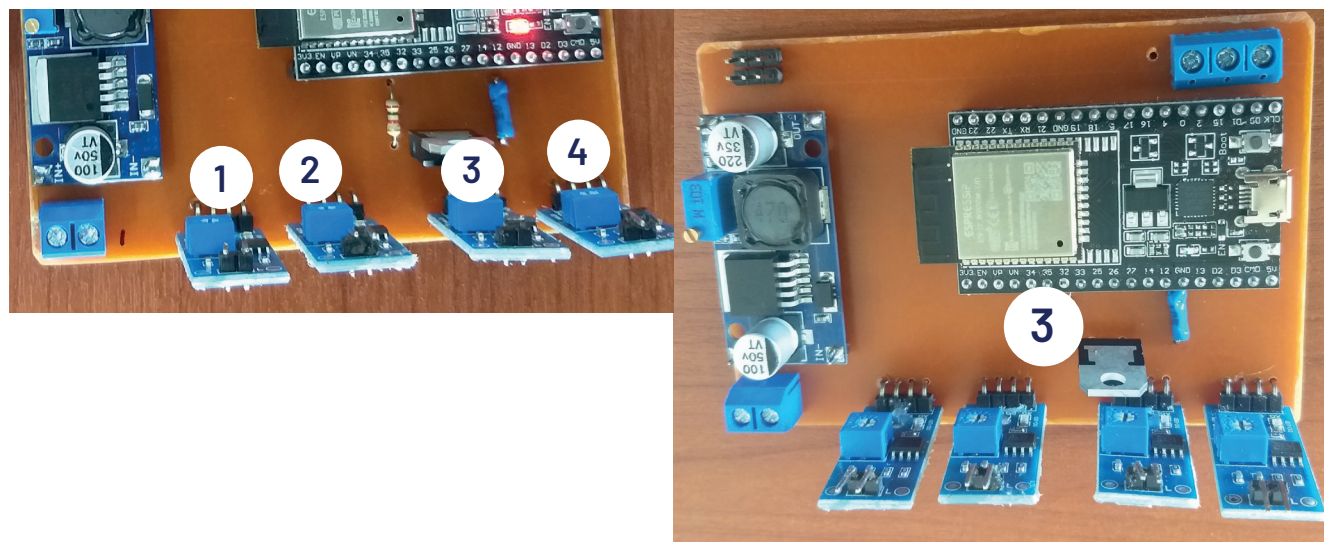


Figura 20. Módulos de los sensores de humedad.



d) **Conexión del dendrómetro:**

Para garantizar un buen funcionamiento se debe conectar el dendrómetro a la entrada analógica designada en la tarjeta de control. Este paso es crucial para la medición de la expansión del tronco del árbol. Asegurándose que las conexiones estén firmes y que el dendrómetro esté configurado correctamente para obtener lecturas precisas (Figura 21).

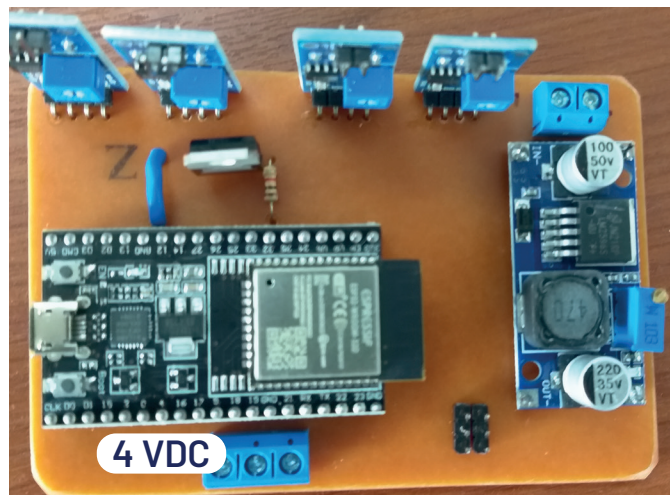


Figura 21. Conexión del dendrómetro a la tarjeta de control.

VCC (+): Conectar a la fuente de alimentación de 5V.

GND (-): Conectar al terminal de tierra del sistema.

Señal (S): Conectar a la entrada analógica o tarjeta de control.

Una vez completados estos pasos, verificar que todas las conexiones estén correctas y asegurarse que no hay cortocircuitos. Encender el dispositivo y si es necesario, volver a cargar el programa a la tarjeta de control.

2.6.2.6. Funcionamiento de la tarjeta de control

a) Conexión Wi-Fi

Asegurarse que el dispositivo esté conectado a una red Wi-Fi activa, los parámetros de conexión se definen mediante codificación en Arduino, definiendo el SSID y la contraseña de la red.

a) Envío de datos al sistema de riego

Los datos obtenidos de los sensores se envían a la plataforma Web (Sistema de riego) mediante un protocolo IoT, luego de lo cual es posible visualizar en tiempo real, mediante gráficos y tablas.

2.6.2.7. Mediciones

Para realizar mediciones de humedad se deben seguir los siguientes pasos:

a) Colocación de los sensores de humedad:

Cada sensor debe ser colocado a diferentes profundidades junto a las raíces del árbol:

- Sensor 1: 10 cm
- Sensor 2: 20 cm
- Sensor 3: 40 cm
- Sensor 4: 50 cm

a) Colocación del dendrómetro:

Para medir la variación del diámetro del tronco, se debe colocar en el tallo del árbol el sensor dendrómetro, sujetando mediante correas de acero y fijado con tornillos. La barrilla de acero del dendrómetro debe ser colocada sobre la corteza del árbol con una goma, de forma que quede fijo y a una distancia que permita accionar los resortes del dendrómetro.

2.6.2.8. Mantenimiento

a) Limpieza del dispositivo

Para garantizar el funcionamiento óptimo y prolongar la vida útil del dispositivo, es fundamental realizar una limpieza adecuada. A continuación, se ofrecen recomendaciones:

- **Desconexión:** Antes de limpiar el dispositivo, asegurarse de desconectar de la fuente de alimentación y de cualquier conexión USB para evitar cortocircuitos o daños.
- **Uso de paño suave:** Utilizar un paño suave y seco para limpiar la carcasa del dispositivo. Evitar usar estropajos o materiales abrasivos que puedan rayar la superficie.
- **Limpieza de sensores:** Limpiar cuidadosamente los sensores de humedad con un paño húmedo. Asegurarse de no sumergir en agua, ni aplicar líquidos directamente sobre ellos. Para los electrodos de los sensores, utilizar un hisopo de algodón ligeramente humedecido para eliminar cualquier residuo de tierra o humedad.
- **Evitar productos químicos:** No usar limpiadores químicos, solventes ni productos abrasivos, ya que pueden dañar los componentes electrónicos y la superficie del dispositivo.
- **Almacenamiento:** Si no se va a utilizar el dispositivo por un tiempo prolongado, guardar en un lugar seco y libre de polvo. Considera usar una bolsa antiestática para protegerlo.



a) Calibración del dispositivo

Para asegurar mediciones precisas y fiables, es esencial realizar la calibración del dispositivo periódicamente. A continuación, se describen los pasos para calibrar los sensores:

- **Frecuencia de calibración:** Se recomienda calibrar el dispositivo al menos una vez cada tres meses o después de cambios significativos en las condiciones ambientales.
- **Preparación:** Asegurarse que el dispositivo esté limpio y en buen estado. Desconectarlo de cualquier fuente de alimentación.
- **Uso de soluciones de calibración:** Preparar soluciones de calibración con niveles conocidos de humedad (por ejemplo, utilizando soluciones saturadas de sal o agua destilada). Esto te permitirá comparar las lecturas del sensor con valores estándar.
- **Proceso de calibración:** Introducir el sensor en la solución de calibración y espera a que la lectura se estabilice. Anotar el valor medido. Comparar la lectura con el valor esperado. Si hay discrepancias, ajusta el coeficiente de calibración en el código.
- **Verificación:** Repetir el proceso con varias soluciones de calibración para asegurarse que el dispositivo esté correctamente calibrado en todo el rango de medición.

a) Documentación:

Guardar un registro de cada calibración realizada, incluyendo la fecha, las soluciones utilizadas y los ajustes realizados. Esto te ayudará a mantener un historial de la precisión del dispositivo.

2.6.2.9. Solución de problemas

A continuación, se presentan algunos problemas comunes con los cuales se pueden encontrar al utilizar la tarjeta de control, junto con sus posibles soluciones:

a) Dificultades de conexión Wi-Fi

Problema: El dispositivo no se conecta a la red Wi-Fi.

Soluciones:

- **Verificar las credenciales:** Asegurarse que el SSID y la contraseña de la red Wi-Fi estén correctamente ingresados en el código.
- **Distancia del router:** Asegurarse que el dispositivo esté dentro del alcance de la señal del router. Si es posible, acercarse al router para verificar la conexión.
- **Reiniciar el dispositivo:** Desconectar y volver a conectar el dispositivo para reiniciar el proceso de conexión.
- **Comprobar el router:** Asegurarse que el router esté funcionando correctamente y que otros dispositivos puedan conectarse a la red.

a) Lecturas erróneas de humedad

Problema: Los sensores de humedad proporcionan lecturas inconsistentes o ilógicas.

Soluciones:

- **Verificar las conexiones:** Asegurarse que todos los sensores estén correctamente conectados a las entradas analógicas del dispositivo.
- **Limpieza de sensores:** Limpiar los electrodos de los sensores de humedad para asegurarse que no haya residuos que afecten las lecturas.
- **Calibración:** Realizar la calibración de los sensores utilizando soluciones de humedad conocidas para asegurarse que las lecturas sean precisas.
- **Condiciones ambientales:** Tener en cuenta que cambios bruscos en la temperatura o la humedad del ambiente pueden afectar las lecturas.

a) Datos no visualizados en ThingsBoard

Problema: Los datos no aparecen en la plataforma Web.

Soluciones:

- **Revisar la conexión MQTT:** Asegurarse que la configuración MQTT en el código de Arduino sea correcta, incluyendo la dirección del servidor y las credenciales.
- **Verificar la configuración ThingsBoard:** Asegurarse de que los dispositivos y las fuentes de datos estén correctamente configurados en la plataforma Web (ThingsBoard).
- **Reiniciar el dispositivo:** Desconectar y volver a conectar el dispositivo para reiniciar el proceso de envío de datos.



RESULTADOS

3.1. Caracterización de suelos

Calicata 1: Se encontraron los horizontes Ap, A1, B1 y B2 (Figura 22 A), cada horizonte presentó variabilidad de textura entre franco-limosa a arcillosa con estructura de bloques angulares y subangulares. En los primeros 47 cm de profundidad no se encontró serosidad, perdiéndose a profundidad. La cantidad de concreciones y la dureza del suelo se incrementaron a partir de los 20 cm, además, se determinó presencia de carbonatos y manganeso a los 20 cm de profundidad (Figura 22 B).

Hubo presencia de raíces hasta los 87 cm, sin presencia de piedras, grietas, pero si hubo reacción a la presencia de alófanos (Figura 22 C; Cuadro 1).

Calicata 2: Se reportaron horizontes Ap, A1, B1 y B2, teniendo variabilidad de textura en cada horizonte oscilando de franco a franco-arcillosa, presentaron estructuras de bloques subangulares, con serosidad débil a partir de los 76 cm de profundidad. La cantidad de concreciones y dureza del suelo se incrementó a partir de los 55 cm. Se encontraron carbonatos hasta los 76 cm de profundidad y manganeso en el horizonte B2. Las raíces estuvieron presentes hasta los 76 cm, sin observar piedras, ni grietas, pero si alófanos en los diferentes horizontes de suelo (Cuadro 2).



Figura 22. A) horizontes de suelos. B) determinación de carbonatos. C) test para detección de alófanos.

3.1.1. Conductividad hidráulica del suelo

El horizonte Ap, tuvo valores promedios de Ch de 4,8 y 2,9 cm h⁻¹, para la calicata 1 y 2; respectivamente. En la calicata 1, el horizonte A1, presentó reducción de la Ch llegando a 1,0 cm h⁻¹, que podría tratarse de un horizonte compactado o pie de arado por la acumulación de arcilla; sin embargo, en esta misma calicata en el siguiente horizonte la Ch se incrementó, alcanzando valores de 13,1 cm h⁻¹, debido posiblemente a la presencia de piedritas en este horizonte. Finalmente, en la calicata 2 se observó que, al profundizar en el perfil, disminuye la Ch, alcanzando los 1,2 cm h⁻¹, en el horizonte B2 (Figura 23). Estos valores encontrados en los horizontes, según la USDA (1999), corresponden a una clasificación de Ch de lento a moderada.

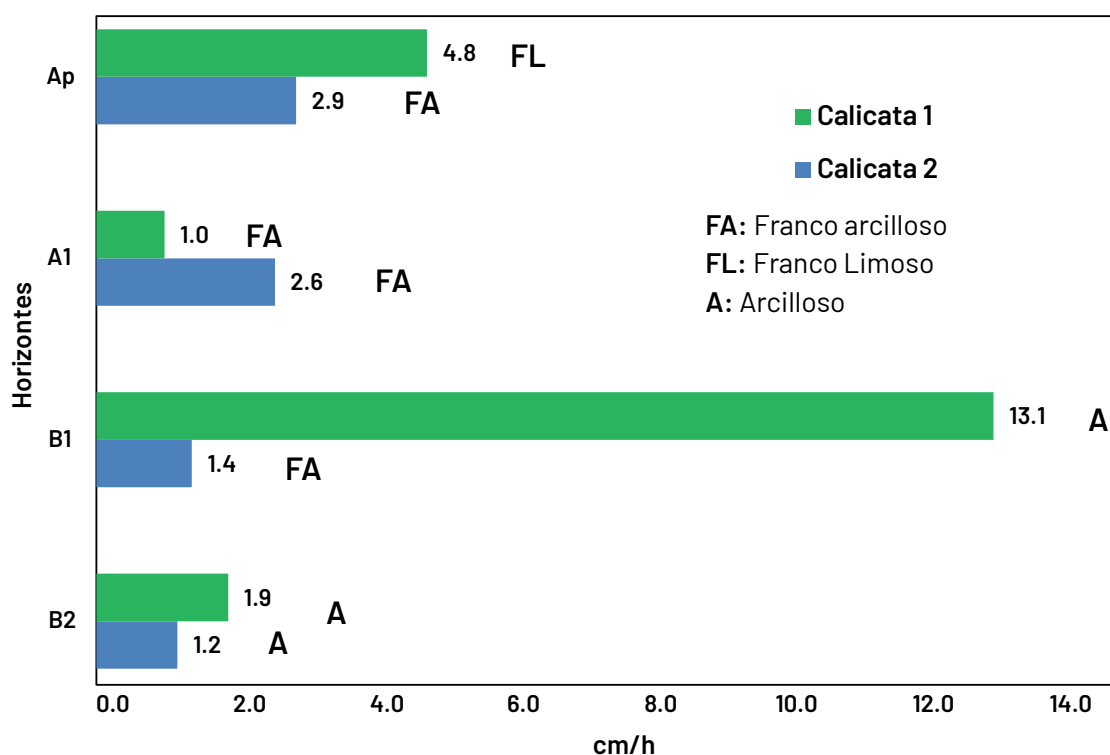


Figura 23. Variación de la conductividad hidráulica de los horizontes de las calicatas 1 y 2.

Cuadro 1. Caracterización de suelos de la calicata 1.

HORIZONTE	PROFUNDIDAD	TEXTURA	ESTRUCTURA	POROS	CEROCIDAD	CONSISTENCIA		CONCRECENCIA			HCO ₃	Mn	RAÍZ	MICRO FAUNA	PIEDRA	GRIETA	ALÓFANA
						SECO	PLÁSTICO	CANTIDAD	TAMAÑO	DUREZA							
AP	0-20	6	5	4	0	1	3	0%	0	0	1	SI	NO	NO	SI		
A1	20-47	5	5	3	0	1	2	1%	1	1	1	2	3	NO	NO	SI	
B1	47-87	4	5	1	2	2	2	40%	1	2	0	2	2	SI	NO	SI	
B2	87>	2	4	1	3	2	3	60%	1	2	0	2	2	NO	NO	SI	

Cuadro 2. Caracterización de suelos de la calicata 2

HORIZONTE	PROFUNDIDAD	TEXTURA	ESTRUCTURA	POROS	CEROCIDAD	CONSISTENCIA		CONCRECENCIA			HCO ₃	Mn	RAÍZ	MICRO FAUNA	PIEDRA	GRIETA	ALÓFANA
						SECO	PLÁSTICO	CANTIDAD	TAMAÑO	DUREZA							
AP	0-20	8	5	4	0	1	2	0%	0	0	1	2	3	SI	NO	NO	SI
A1	24-55	8	5	4	0	1	0	0%	0	0	1	1	3	SI	NO	NO	SI
B1	55-76	5	5	4	0	1	2	2%	1	2	1	2	2	NO	NO	NO	SI
B2	76>	4	5	5	1	1	3	5%	1	2	0	3	0	MO	NO	NO	SI



ABREVIATURAS: Ap (Horizonte perturbado), A1 (Capa enriquecida con materia orgánica), B1 (Horizonte de transición con A), B2 (acumulación de coloides formado por arcilla sedimentada) Textura: 2. Arcilloso, 4. Franco-Arcilloso, 5. Franco-Arcilloso-Arenoso, 6. Franco-Limoso, 8. Franco. Estructura: 4. Bloques Angulares, 5. Bloques Subangulares. Porosidad: 1. Sin Poros visibles, 3. pequeños 1-2 mm, 4. medios 2-5 mm y 5. grandes 5-10 mm. Cerosidad: 0. Sin Cerosidad, 1. Débil, 2. Moderado, 3. Fuerte Consistencia. Dureza: 1. Suelta, 2. Muy fiable, 3. Friable. Concrecencia: Cantidad < 5%. Muy poco. Frecuente (15-40%). Muy frecuente (60-80%) Tamaño: 0. Ausencia 1. pequeño < 1cm. Dureza: 0. Ausencia, 2. Duro. Carbonatos (HCO₃): 0. Ausencia, 1. Ligeramente Efervescente. Manganeso (Mn). 1. Ligeramente Efervescente, 2. Fuertemente Efervescente, 3. Violentamente Efervescente. Raíces: 0. Sin Raíces, 2. Raíces Finas, 3. Raíces Finas y Gruesas.

3.1.2. Análisis físico-químico de suelos

En el cuadro 3, se observa los valores de los análisis físico-químicos del suelo correspondientes a las dos calicatas, resaltando que el pH de los diferentes horizontes varió de 5,5 a 6,3; valores que no resultan problema para la nutrición del cultivo. El pH más bajo se observó en la calicata 1 con 5,5 en los primeros 20 cm de profundidad (HAp). El N, P, S y B, disminuyeron a mayor profundidad del suelo. En general la disponibilidad bases como Ca, Mg y K están en niveles medios a altos en los diferentes horizontes. Con los valores de pH antes indicados no se esperaba tener problemas de deficiencias de micronutrientes, siendo que el Zn, Cu, Fe y Mn está presente en cantidades medias a altas, con excepción del Mn que presenta valores bajos en profundidad.

Cuadro 3. Análisis de caracterización de los suelos de las dos calicatas en el lote experimental.

Calicata	pH	NH4	P	K	Ca	Mg	S	Zn	Cu	Fe	Mn	B	MO	
		mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	meq 100 mL ⁻¹	meq 100 mL ⁻¹	meq 100 mL ⁻¹	meq 100 mL ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	dag kg ⁻¹	
Calicata 1 AP 0-20	5,5	Ac	11	1	0,5	8	2	9	13	8	1	1	0,3	3
Calicata 1 A1 20-47	5,9	Me	11	1	0,4	8	2	7	9,2	5	1	6	0,2	2
Calicata 1 B1 47-87	6,1	LAc	10	3	0,2	7	1,8	7	7,1	5	2	4	0,2	1
Calicata 1 B2 + 87	6,0	Me	10	3	0,2	6	1,8	7	7,4	2	1	3	0,2	1
Calicata 2 AP 0-24	6,2	LAc	13	2	0,9	1	2,4	8	16	5	1	5	0,2	2
Calicata 2 A1 24-55	6,2	LAc	13	1	0,4	1	1,9	8	9,1	5	1	3	0,2	2
Calicata 2 B1 55-76	6,3	LAc	12	1	0,4	8	1,9	8	5,8	5	2	2	0,2	1
Calicata 2 B2 >76	6,3	LAc	10	6	0,3	6	1,8	7	5,7	4	2	2	0,2	1

Ac RC Ácido. MeAC: Medianamente Ácido, B: Bajo, M: Medio, A: Alto

Calicata	CE	C a	Mg	Ca+ Mg	Σ bases CIC	Arena Limo			Clase Textural		
						Arcilla					
	dS m ⁻¹	M g	K	K	meq 100 mL ⁻¹			%			
Calicata 1	0,	N/	3,	4,0	18,5					Franco	
AP 0-20	12	S	6	0	5	10,75	13,	24	50	26	Limoso
Calicata 1	0,	N/	4,	4,7	23,8						Franco
A1 20-47	11	S	0	6	1	10,42	11,	26	42	32	Arcilloso
Calicata 1	0,	N/	3,	6,9	33,8						Arcilloso
B1 47-87	10	S	8	2	5	9,08	10,	20	36	44	Arcilloso
Calicata 1	0,	N/	3,	8,1	35,4						Arcilloso
B2 + 87	10	S	3	8	5	8,02	9,5	10	16	74	Arcilloso
Calicata 2	0,	N/	4,	4,9	25,3						Franco
AP 0-24	15	S	1	0	1	12,89	15,	24	46	30	Arcilloso
Calicata 2	0,	N/	5,	4,7	29,7						Franco
A1 24-55	15	S	2	5	5	12,30	14,	24	48	28	Arcilloso
Calicata 2	0,	N/	4,	5,5	29,1						Franco
B1 55-76	14	S	2	9	2	10,24	11,	22	44	34	Arcilloso
Calicata 2	0,	N/	3,	5,3	25,3						Arcilloso
B2 >76	13	S	7	3	3	7,90	9,6	16	26	58	Arcilloso

La conductividad eléctrica de los suelos, no presenta problemas; sin embargo, la cantidad de materia orgánica del suelo (MO) en general es baja típico de suelos tropicales, por la alta temperatura y aplicación de riego en la plantación, llegando a 3,0% en superficie en la calicata 1. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) de estos suelos van de bajos a medios, disminuyendo a profundidad, mostrando valores tan bajos como 9,59 meq 100 mL⁻¹ en el horizonte B2 de la calicata 1 y alto como 15,49 meq 100 mL⁻¹ en el horizonte Ap de la calicata 2. La textura varió de franco limosa en la superficie, a arcilloso en profundidad, siendo que el menor porcentaje de arcilla correspondió al horizonte Ap de la calicata 1 (Cuadro 3).



3.1.3. Densidad aparente del suelo

En la Figura 24 se observa que la Densidad del suelo es bajo en los primeros 0,30 m de profundidad, presentando la mayoría valores menores a $1,0 \text{ t m}^{-3}$. A mayores profundidades se encontró valores superiores a los de la superficie, pero no sobrepasan los $1,35 \text{ t m}^{-3}$, que para la textura franca de estos suelos no presentaría problema para el crecimiento de las raíces. Otra variación que se encontró fue que a mayor distancia del tronco (calles) la Da del suelo fue mayor.

3.1.4. Densidad real del suelo

Los valores de DR del suelo se observan en la figura 25, donde fluctúan entre $2,13 \text{ t m}^{-3}$ y $2,98 \text{ t m}^{-3}$, siendo que los valores menores corresponden a los primeros centímetros de suelo superficial, donde la mayor presencia de MO, provoca este tipo de variación.

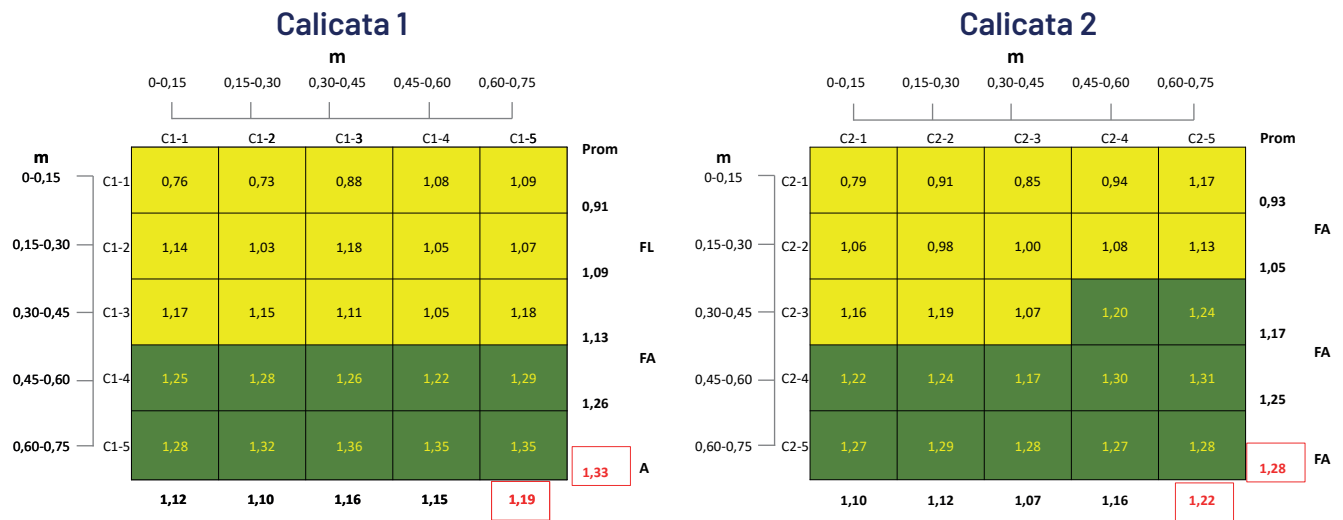


Figura 24. Densidad aparente a diferentes distancias del tronco y profundidad del suelo.

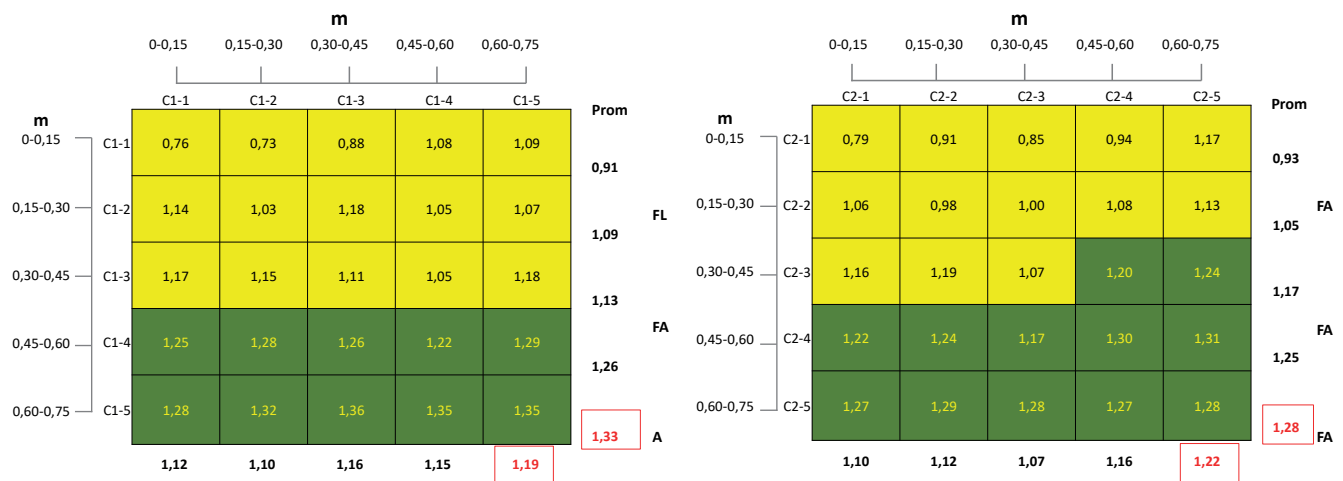


Figura 25. Densidad real a diferentes distancias del tronco y profundidad del suelo.

3.1.5. Porosidad del suelo

Se encontró un alto porcentaje de porosidad (Figura 26) en los primeros 0,15 m en las dos calicatas, con valores que oscilan entre 50,77 y 66,24 % y a medida que se profundiza en el suelo, se reduce el porcentaje de poros, efecto que también puede ser atribuido a la variación en la presencia de MO.

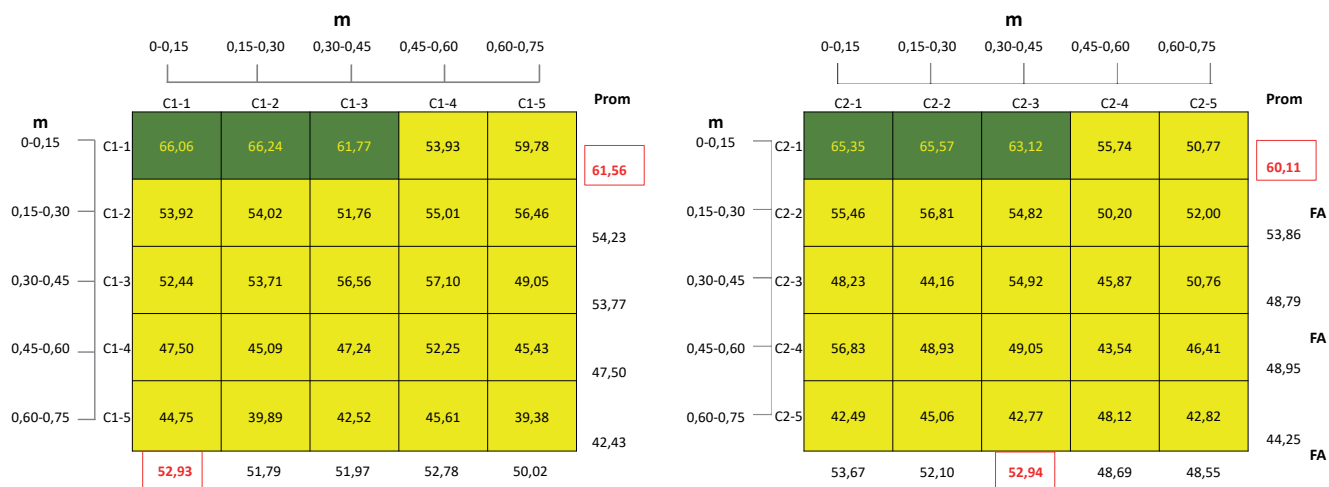


Figura 26. Porosidad a diferentes distancias del tronco y profundidad del suelo.



3.2. Evapotranspiración (ETo)

Durante el periodo experimental los niveles de ETo alcanzaron un valor acumulado de 453 mm, aumentando a medida que pasaban los días, llegando a alcanzar valores por encima de $4,5 \text{ mm d}^{-1}$ en el mes de septiembre (Figura 27A). La temperatura máxima media fue de $29 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y la humedad relativa media fue del 70 %. Durante el ensayo se presentaron lluvias de una magnitud de 120 mm en total y a partir del día 226 (14 de agosto) la humedad del suelo cayó por debajo de capacidad de campo, esta tendencia se mantiene hasta el día 290 (12 de octubre)(Figura 27B).

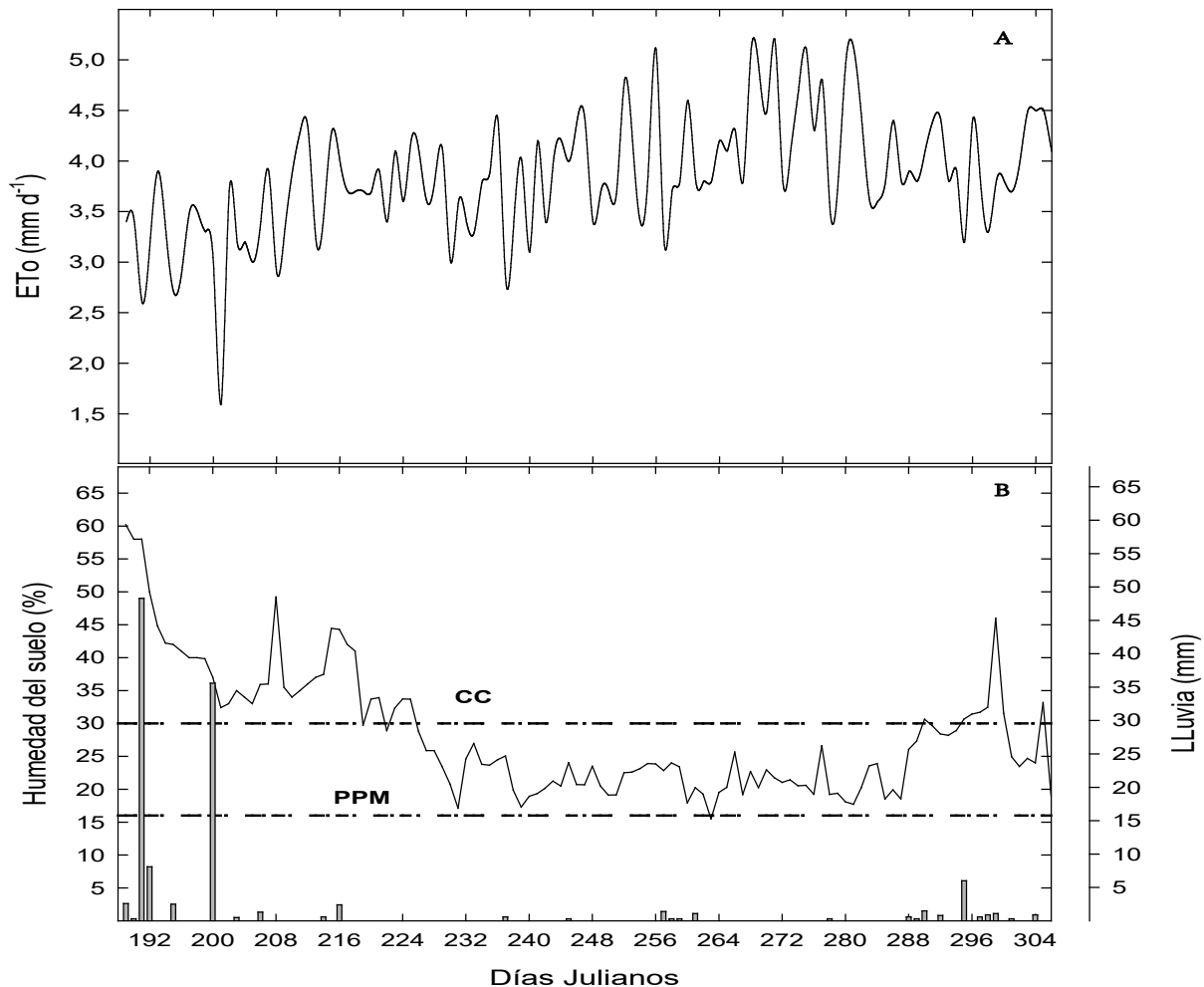


Figura 27. Valores de evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo) (A), humedad del suelo y precipitación (lluvia mm)(B) durante el periodo experimental.

3.3. Potencial hídrico foliar y tallo

En la figura 28A se observa que los niveles del Ψ_{md} en las plantas de cacao no presentaron ningún patrón, obteniéndose los valores más bajos los días 206 (25 de septiembre) y 286 (13 de octubre), con magnitudes de $-0,67$ y $-0,51$ MPa respectivamente. El mayor valor se presentó el día 192 (11 de julio) con $-0,16$ MPa lo cual se debe a las lluvias ocurridas previas a la medición, indicada en la Figura 28B.

Los niveles del Ψ_{tallo} presentan un comportamiento similar al Ψ_{md} en las plantas de cacao presentándose los valores más bajos los días 206 y 286 (13 de octubre), con magnitudes de $-0,30$ y $-0,32$ MPa, respectivamente. El valor más positivo se presentó el día 192 con un valor de $-0,12$ MPa.

A medida que trascurrió el ensayo, no se presentaron eventos de precipitación y los valores de humedad en el suelo disminuyeron (Figura 28B); a pesar de esto, los árboles de cacao no presentan una tendencia de disminución constante del potencial hídrico, lo cual puede deberse a lo afirmado por Jiménez-Pérez et al. (2019), quienes trabajaron con el cacao tipo Guasare y observaron que los árboles mantienen su turgencia bajo condiciones desfavorables, principalmente en horas del mediodía que es cuando ocurre la mayor demanda de la evaporación del agua, lo que parece indicar que el árbol de cacao es capaz de realizar ajustes osmóticos.

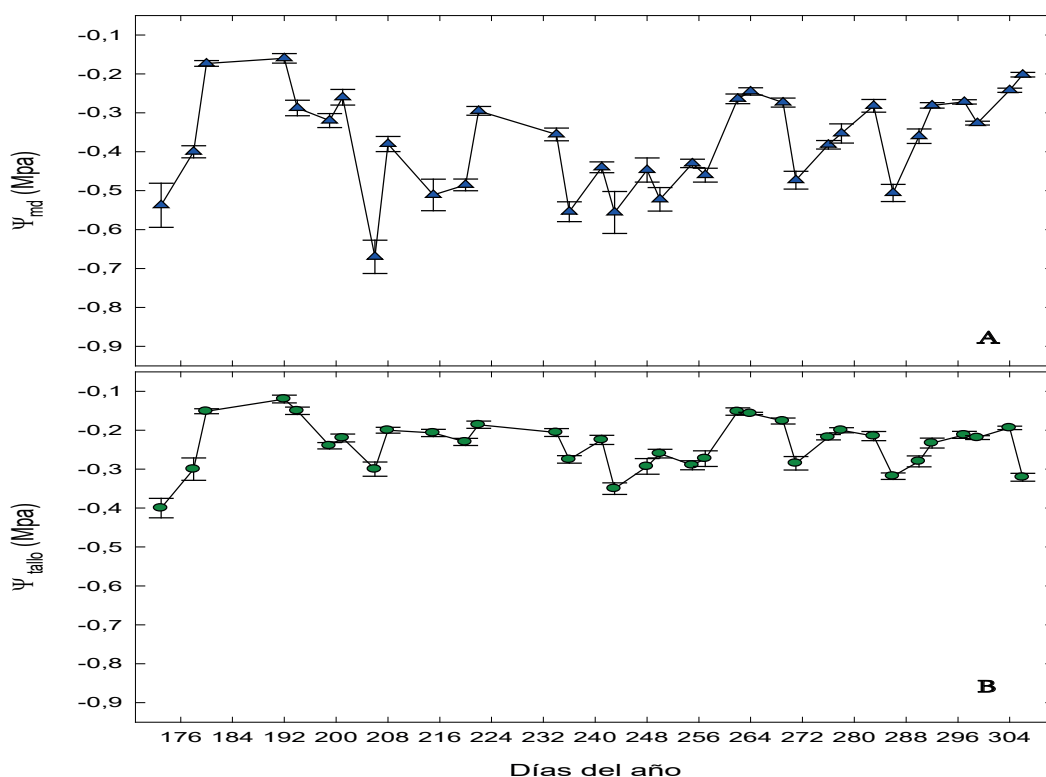


Figura 25. Valores de potencial hídrico foliar al mediodía (Ψ_{md}) (A) y potencial hídrico del tallo (Ψ_{tallo}) (B) de árboles de cacao adultos durante el periodo experimental. La barra vertical indica el error de la media. Cada punto representa la media de diez valores.



3.4. Intercambio de gases

En la figura 29A se observa los niveles de tasa de respiración (E) durante el periodo evaluado, los valores más altos se presentan en los días 269 (26 de septiembre) y 271 (28 de septiembre), con 2,57 y 2,62 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente. Estos valores coinciden con eventos de precipitación de poca magnitud ocurridas previos a la medición (Figura 29B). El valor más bajo de esta variable se presentó a los días 192 (11 de julio) y 208 (27 de julio) con un valor de 1,12 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, el promedio de E durante el periodo evaluado fue de 1,68 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, lo cual está por debajo de lo reportado por Agudelo-Castañeda et al. (2018), quienes encontraron valores entre 1,91 y 2,15 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, evaluando el rendimiento fisiológico de nueve clones de cacao bajo sombra en Rionegro, Colombia.

Con respecto a la conductancia estomática (gs), los valores más altos se presentan los días 248 (5 de septiembre) y 278 (5 de octubre) con 150 y 147 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ respectivamente, los valores más bajos ocurren los días 201 (20 de julio) y 206 (25 de julio) con 71 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figura 29B). El valor promedio de esta variable durante el periodo evaluado fue de 106,55 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, estos valores son similares a los reportados por Tezara et al. (2016), quienes valoraron árboles de cacao Forastero y Criollo de más de 50 años de edad en Isla de Margarita, Venezuela, encontrando valores de 157 y 182 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente.

La asimilación de CO_2 (A) presentó valores más altos los días 299 (26 de octubre) y 248 (5 de septiembre), con valores de 8,74 y 8,70 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ respectivamente, lo que coincide con las lluvias que antecedieron (Figura 29C). Los valores más bajos se presentaron los días 194 (13 de julio) y 297 (24 de octubre) con valores de 4,08 y 4,06 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ respectivamente. El promedio de la tasa fotosintética fue de 6,24 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Los valores obtenidos durante el periodo evaluado, fueron similares a los obtenidos por Janani et al. (2019), quienes demostraron en diferentes genotipos de cacao bajo condiciones de invernadero, que estos responden a los cambios de humedad del suelo, reduciendo sustancialmente la tasa de fotosíntesis, reportando valores de 6,48 y 4,09 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ con dos niveles humedad 100 y 50% de capacidad de campo, respectivamente.

La información recopilada, sirve de base para entender las respuestas del cacao en condiciones de luz y temperatura y aún se necesita más investigación para lograr una mayor comprensión de las complejidades de los cambios climáticos y sus efectos en la producción del cacao. Aunque las predicciones climáticas futuras son preocupantes, existe la expectativa de que haya suficiente diversidad genéticas que permita seleccionar cultivares más tolerantes a altas temperatura. Con esta información nos proyecta a conocer que, si se siembra cacao en lugares con temperatura superiores a 30 °C, provocará cierres estomáticos y consecuentemente disminuciones de A además de daños en el aparato fotosintético.

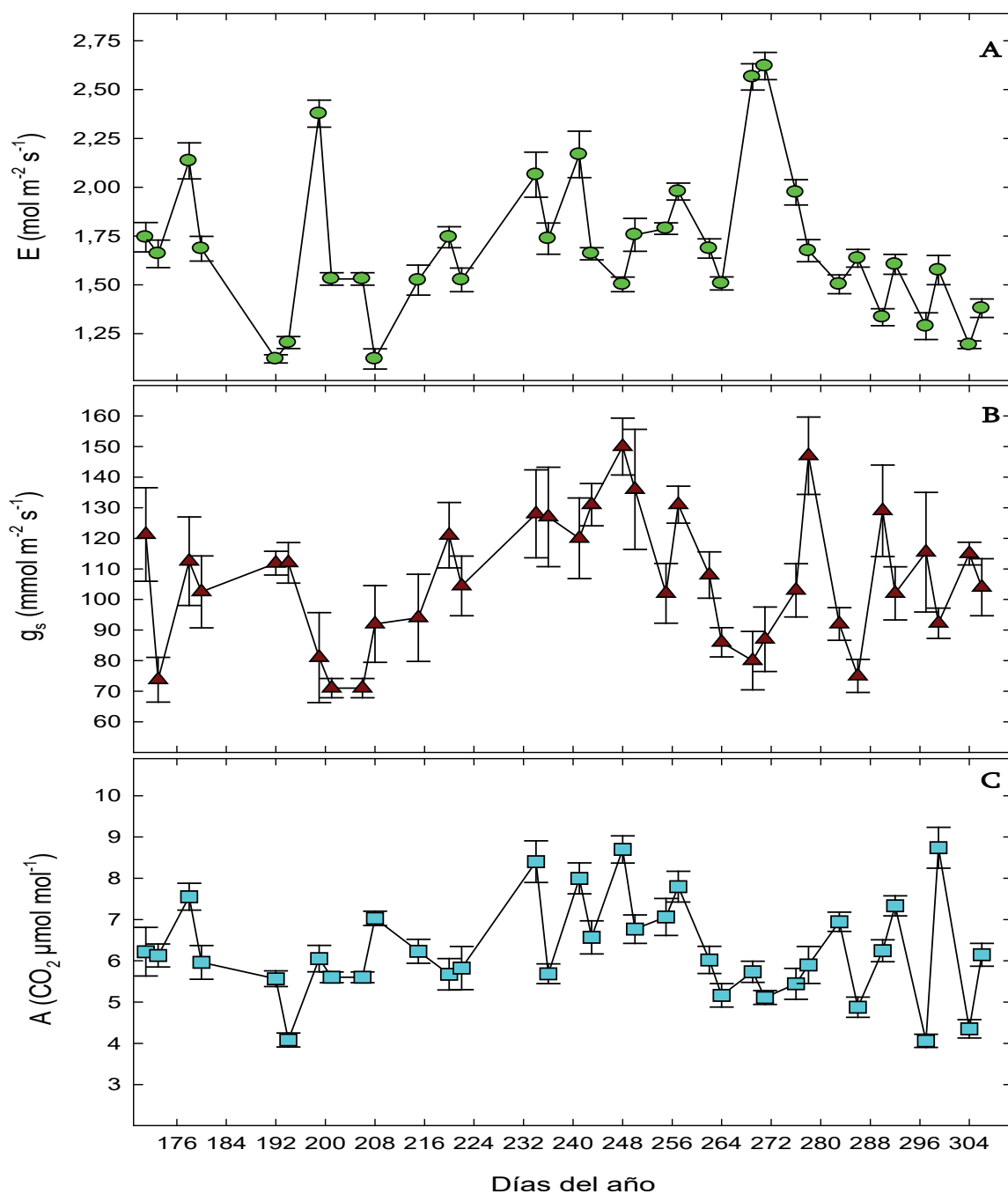


Figura 29. Valores de tasa de transpiración (E) (A), conductancia estomática (g_s) (B) y tasa fotosintética (A) (C) de árboles de cacao adultos durante el periodo experimental. La barra vertical indica el error de la media. Cada punto representa la media de diez valores.



3.5. Contracción mínima del tallo

En la figura 30 se muestran los datos de la máxima contracción de diámetro de tallo (MCDT), obteniéndose los mayores valores al principio del periodo evaluado, reduciendo estos valores a partir del día 290 (18 de octubre) donde se producen precipitaciones de poca magnitud (Figura 30A), pero a las que esta variable responde muy rápidamente, lo que concuerda con diferentes autores (Ortuño et al., 2006; García-Orellana et al., 2007; Ortuño et al., 2009; Galindo et al., 2013; Sadka et al., 2023; Wheeler et al., 2023), quienes han trabajado en otros cultivos, refiriéndose a que los valores de MCDT pueden servir de referencia para la estimación del estado hídrico como respuesta a las variaciones de humedad, con la ventaja de ser mediciones fáciles y de bajo costo.

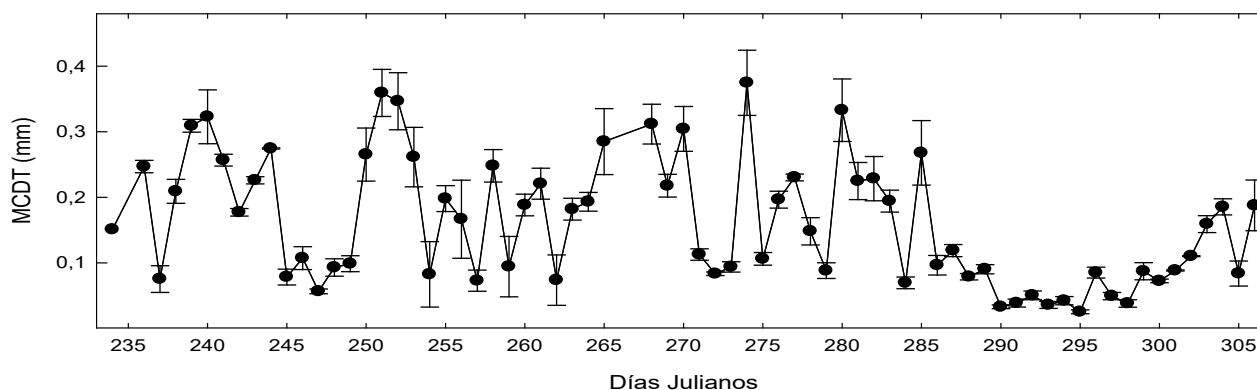


Figura 30. Valores de máxima contracción diaria del tronco (MCDT) de árboles de cacao adultos, durante el periodo experimental. La barra vertical indica el error de la media. Cada punto representa la media de diez valores.

3.6. Regresiones de variables fisiológicas

En la figura 31 se aprecia que los valores del Ψ_{md} y Ψ_{tallo} presentaron relaciones inversa con parámetros de evapotranspiración del cultivo de referencia (E_{To}), la temperatura máxima y el déficit de presión de vapor (DPV) durante el periodo evaluado; siendo que, a medida que aumentan los parámetros, tanto el Ψ_{md} como el Ψ_{tallo} disminuyen. Para los árboles de cacao la mejor correlación con el Ψ_{md} se presentó con el DPV, en cambio el Ψ_{tallo} se correlaciona mejor con la E_{To} .

Según Medina y Laliberte (2017) en cacao se alcanza un nivel de estrés severo con valores de potencial hídrico de hoja de $-1,76$ MPa, valores que no fueron alcanzados durante el periodo evaluado, esto puede deberse al tipo de suelo y a la condición atípica de patrones de precipitación del año donde se realizó el estudio (Figura 31A). Osorio et al. (2021), obtuvo para el clon CCN-51 en condiciones no limitantes de agua valores de Ψ_{md} de $-0,18$ MPa y bajo condiciones de estrés hídrico, valores de $-2,48$ MPa, por lo cual se puede inferir que en ningún momento los árboles evaluados estuvieron bajo condiciones de estrés hídrico (Figura 31B), lo cual pudo haber influido en la baja correlación que se encontró con las variables analizadas.

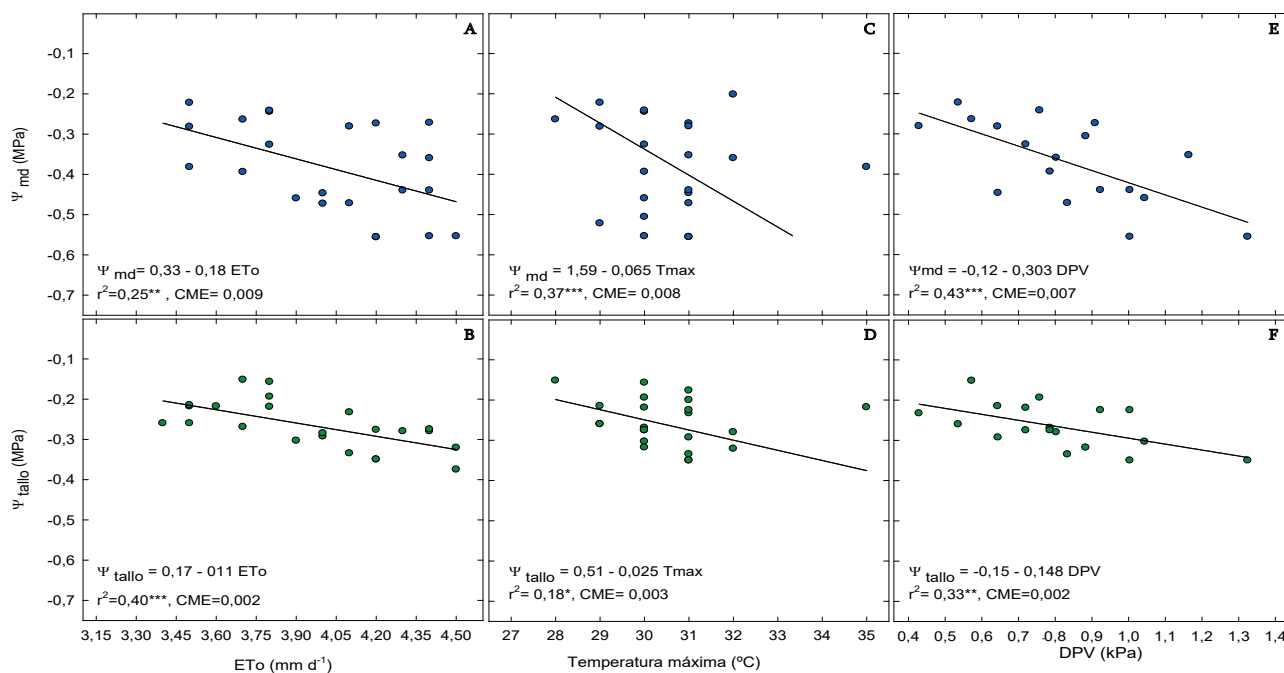


Figura 31. Relación entre la evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo) (A - B), la temperatura máxima (C-D) y el déficit de presión de vapor (DPV) (D - E) con el potencial hídrico del foliar (Ψ_{md}) y el potencial hídrico del tallo (Ψ_{tallo}) en árboles de cacao adultos durante el periodo experimental. Cada punto representa la media de diez valores.

En la figura 32, se aprecia que la variable que presenta una mejor correlación con la MCDT es el Ψ_{md} , seguido del Ψ_{tallo} , tanto la tasa fotosintética (A) como la conductancia estomática no presentaron buena correlación, durante el periodo evaluado. A medida que aumenta la conductancia y el flujo de CO_2 en la hoja, la velocidad de circulación o extracción de agua aumenta, provocando que los vasos conductores pierdan agua más rápido de lo que puede extraer la planta del suelo; sin embargo, cuando el suministro de agua es adecuado y no encuentra límites, la planta aunque el diámetro del tallo no aumenta, los estomas permanecen abiertos y la planta alcanza los mayores valores de actividad estomática; entonces, esto puede deberse a la humedad disponible del suelo y la capacidad de la planta para tomarla.

En cambio, la relación de la contracción del tallo es más directa, siendo que a medida que disminuye el potencial, implica que la tasa de extracción de agua es más baja y por lo tanto los vasos conductores no se deprimen porque se hace más fácil para la planta suministrar el agua que requieren las hojas, alcanzando la curva valores mayores o menores, dependiendo de la condición hídrica del suelo y de la capacidad de las raíces para tomar agua y permitir que la planta la utilice.

Es conveniente considerar que el potencial relaciona la demanda de agua con la oferta del sistema vascular de la planta (fuente) y la tasa respiratoria muestra la relación instantánea entre la cantidad de agua presente en la hoja y la que ella necesita. Por tanto, la relación entre el potencial y la MCDT resulta mejor que la encontrada entre la tasa fotosintética y el MCDT.

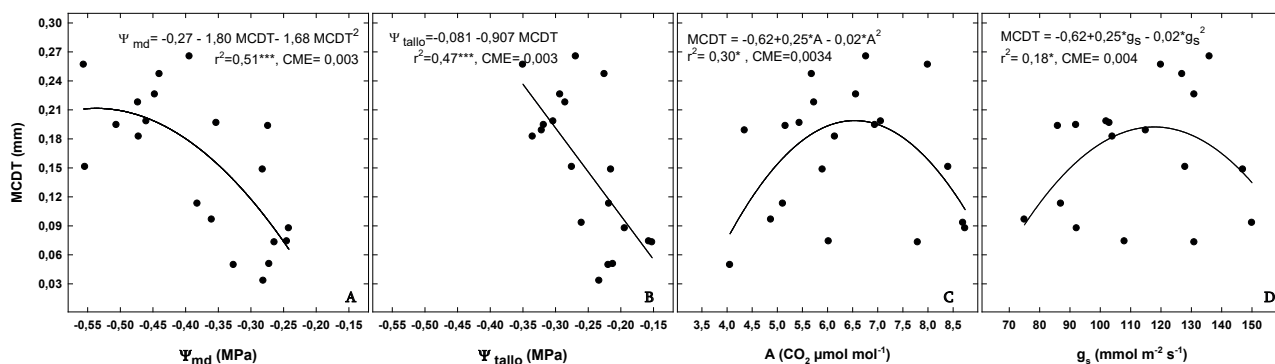


Figura 32. Relación entre las tasas diarias de la máxima contracción diaria del tronco (MCDT) con el potencial hídrico del foliar (Ψ_{md}) (A) y del tallo (Ψ_{tallo}) (B), tasa fotosintética (A) (C) y conductancia estomática (g_s) (D) en los árboles de cacao adultos durante el periodo experimental. Cada punto representa la media de diez valores.

Conclusiones

Existe una relación importante entre el potencial de tallo y la MCDT en plantas adultas de cacao, lo cual sugiere una importante relación entre ambos y que la MCDT es un buen indicador del estado hídrico de las plantas.

La correlación del MCDT es mayor con parámetros climáticos como el DPV y la ETo que con la temperatura máxima, por lo cual este parámetro podría usarse para estimar la ETo de árboles adultos de cacao con suficiente precisión.

Ante un escenario climático de alta temperatura una estrategia del cultivo será su combinación con árboles. El cacao en campo al parecer mantiene altas tasas de A en radiaciones de 800 a 1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Por ello es importante lograr esta condición con la combinación de árboles por lo que el manejo del sombreado en las plantaciones de cacao resulta un aspecto a seguir investigando.



Referencias

- Avadí, A. (2023). Environmental assessment of the Ecuadorian cocoa value chain with statistics-based LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 28(11), 1495-1515.
- Agudelo-Castañeda, G. A., Cadena-Torres, J., Almanza-Merchán, P. J., & Pinzón-Sandoval, E. H. (2018). Desempeño fisiológico de nueve genotipos de cacao (*Theobroma cacao* L.) bajo la sombra de tres especies forestales en Santander, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 12(1), 223-232. <http://dx.doi.org/10.17584/rcch.2018v12i1.7341>
- Alban, A., Elain, S., Hebbar, K., Mathias, T., Séverin, A. (2015). Morpho-physiological criteria for assessment of two month old cocoa (*Theobroma cacao* L.) genotypes for drought tolerance. *Indian Journal of Plant Physiology*, 21(1), 23-30. <https://doi.org/10.1007/s40502-015-0195-y>
- Barbagallo, M. G., Vesco, G., Di Lorenzo, R., Lo Bianco, R., & Pisciotta, A. (2021). Soil and regulated deficit irrigation affect growth, yield and quality of 'Nero d'Avola' grapes in a semi-arid environment. *Plants*, 10(4), 641. <https://doi.org/10.3390/plants10040641>
- Borja, N., Cho, J., & Choi, K. S. (2017). The influence of climate change on irrigation water requirements for corn in the coastal region of Ecuador. *Paddy and water environment*, 15, 71-78. <https://doi.org/10.1007/s10333-016-0529-z>
- Cavazza, F., Galioto, F., Raggi, M., & Viaggi, D. (2018). The role of ICT in improving sequential decisions for water management in agriculture. *Water*, 10(9), 1141. <https://doi.org/10.3390/w10091141>
- Centeno, A., Baeza, P., & Lissarrague, J. R. (2010). Relationship between soil and plant water status in wine grapes under various water deficit regimes. *HortTechnology*, 20(3), 585-593. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.20.3.585>
- Chimarro, J., & Freire, F. (2023). Device for Determining Variations in Stem Thickness of Trees. ESPOCH Congresses: *The Ecuadorian Journal of STEAM*, 510-520. <https://doi.org/10.18502/epoch.v3i1.14470>
- Conejero, W., Ortuño, M. F., Mellisho, C. D., & Torrecillas, A. (2010). Influence of crop load on maximum daily trunk shrinkage reference equations for irrigation scheduling of early maturing peach trees. *Agricultural Water Management*, 97(2), 333-338. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.10.003>
- De Almeida, J., Tezara, W., & Herrera, A. (2016). Physiological responses to drought and experimental water deficit and waterlogging of four clones of cacao (*Theobroma cacao* L.) selected for cultivation in Venezuela. *Agricultural Water Management*, 171, 80-88. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.03.012>
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M. Y., y Robledo C.W. Infostat versión (2020). Centro de Transferencia Infostat. FCA. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.



- Galindo, A., Rodríguez, P., Mellisho, C. D., Torrecillas, E., Moriana, A., Cruz, Z. N., ... & Torrecillas, A. (2013). Assessment of discretely measured indicators and maximum daily trunk shrinkage for detecting water stress in pomegranate trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 180, 58-65. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.05.006>
- García-Orellana, Y., Ruiz-Sánchez, M. C., Alarcón, J. J., Conejero, W., Ortuño, M. F., Nicolás, E., & Torrecillas, A. (2007). Preliminary assessment of the feasibility of using maximum daily trunk shrinkage for irrigation scheduling in lemon trees. *Agricultural Water Management*, 89(1-2), 167-171. doi:10.1016/j.agwat.2006.12.008
- García-Orellana, Y., Ruiz-Sánchez, M. C., Alarcón, J. J., Conejero, W., Ortuño, M. F., Nicolás, E., & Torrecillas, A. (2007). Preliminary assessment of the feasibility of using maximum daily trunk shrinkage for irrigation scheduling in lemon trees. *Agricultural Water Management*, 89(1-2), 167-171. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.12.008>
- Girón, I. F., Corell, M., Martín-Palomo, M. J., Galindo, A., Torrecillas, A., Moreno, F., & Moriana, A. (2016). Limitations and usefulness of maximum daily shrinkage (MDS) and trunk growth rate (TGR) indicators in the irrigation scheduling of table olive trees. *Agricultural Water Management*, 164, 38-45. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.014>
- Goldhamer, D. A., Fereres, E., Mata, M., Girona, J., & Cohen, M. (1999). Sensitivity of continuous and discrete plant and soil water status monitoring in peach trees subjected to deficit irrigation. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 124(4), 437-444. <https://doi.org/10.21273/JASHS.124.4.437>
- Idawati, I., Sasongko, N. A., Santoso, A. D., Septiani, M., Handayani, T., Sakti, A. Y. N., & Purnamasari, B. D. (2024). Cocoa farmers' characteristics on climate variability and its effects on climate change adaptation strategy. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 10(1), 337-354. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2024.01.21>
- International Cocoa Germplasm Database (<http://www.icgd.rdg.ac.uk>) - The University of Reading, Reading 2006
- Janani, P., Kumar, N., & Jegadeeswari, V. (2019). Dynamics of gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters of cocoa genotypes in response to water deficit. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 8(6), 415-419. <https://www.phytojournal.com/archives/2019/vol8issue6/PartG/8-5-456-413.pdf>
- Jiménez-Pérez, A., Cach-Pérez, M. J., Valdez-Hernández, M., & Rosa-Manzano, E. D. L. (2019). Efecto del manejo del dosel en el estado hídrico del cacao (*Theobroma cacao*) y el microclima dentro del área de cultivo. *Botanical Sciences*, 97(4), 701-710. <http://www.ciens.ula.ve/icae/publicaciones/ecofisiologia/pdf/rada2005.pdf>
- McDowell, N. G., Sapes, G., Pivovarov, A., Adams, H. D., Allen, C. D., Anderegg, W. R., ... & Xu, C. (2022). Mechanisms of woody-plant mortality under rising drought, CO₂ and vapour pressure deficit. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(5), 294-308. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00272-1>

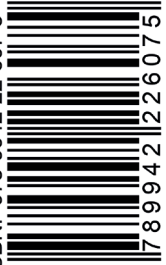


- Medina, V., and Laliberte, B. (2017). A Review Of Research On The Effects Of Drought And Temperature Stress And Increased CO₂ On Theobroma Cacao L., And The Role Of Genetic Diversity To Address Climate change. Costa Rica Bioversity Int. Available online at: <https://cgspace.cgiar.org/handle/1056/89084>
- Mirás-Avalos, J. M., Pérez-Sarmiento, F., Alcobendas, R., Alarcón, J. J., Mounzer, O., & Nicolás, E. (2017). Maximum daily trunk shrinkage for estimating water needs and scheduling regulated deficit irrigation in peach trees. *Irrigation science*, 35, 69-82. <https://doi.org/10.1007/s00271-016-0523-7>
- Moreno-Miranda, C., Molina, I., Miranda, Z., Moreno, R., & Moreno, P. (2020). La cadena de valor de cacao en Ecuador: Una propuesta de estrategias para coadyuvar a la sostenibilidad. *Bioagro*, 32(3), 205-214. https://sga.unemi.edu.ec/media/evidenciasiv/2021/08/10/articulo_2021810105931.pdf
- Moriana, A., Moreno, F., Girón, I. F., Conejero, W., Ortuño, M. F., Morales, D., ... & Torrecillas, A. (2011). Seasonal changes of maximum daily shrinkage reference equations for irrigation scheduling in olive trees: influence of fruit load. *Agricultural Water Management*, 99(1), 121-127. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.07.008>
- Nair, K. P. (2021). Cocoa (Theobroma cacao L.). In: Tree Crops. Harvesting Cash from the World's Important Cash Crops, 153-213. https://doi.org/10.1007/978-3-030-62140-7_5
- Neira, D. P. (2016). Energy sustainability of Ecuadorian cacao export and its contribution to climate change. A case study through product life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2560-2568. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.003>
- Ortiz-Bobea, A., Ault, T. R., Carrillo, C. M., Chambers, R. G., & Lobell, D. B. (2021). Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth. *Nature Climate Change*, 11(4), 306-312.
- Ortuño, M. F., Brito, J. J., García-Orellana, Y., Conejero, W., & Torrecillas, A. (2009). Maximum daily trunk shrinkage and stem water potential reference equations for irrigation scheduling of lemon trees. *Irrigation Science*, 27, 121-127. <https://doi.org/10.1007/s00271-008-0126-z>
- Ortuño, M. F., García-Orellana, Y., Conejero, W., Ruiz-Sánchez, M. C., Mounzer, O., Alarcón, J. J., & Torrecillas, A. (2006). Relationships between climatic variables and sap flow, stem water potential and maximum daily trunk shrinkage in lemon trees. *Plant and Soil*, 279, 229-242. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-1302-z>
- Osorio Zambrano, M. A., Castillo, D. A., Rodriguez Perez, L., & Terán, W. (2021). Cacao (Theobroma cacao L.) response to water stress: Physiological characterization and antioxidant gene expression profiling in commercial clones. *Frontiers in Plant Science*, 12, 700855. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.700855>
- Paltineanu, C., Chitu, E., Sumedrea, D., & Florea, A. (2020). Correlation between maximum trunk daily shrinkage, soil matric potential and weather variables for mature plum trees in medium-textured soils and temperate climate. *Erwerbs-Obstbau*, 62(2), 201-211. <https://doi.org/10.1007/s10341-020-00472-3>



- Puerto, P., Domingo, R., Torres, R., Pérez-Pastor, A., & García-Riquelme, M. (2013). Remote management of deficit irrigation in almond trees based on maximum daily trunk shrinkage. Water relations and yield. *Agricultural water management*, 126, 33-45. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.04.013>
- Sadka, A., Razzon, S., & Paz-Kagan, T. (2023). The Effect of Varied Irrigation Regimes on Citrus Tree Water Status, as Monitored by Remote and Proximal Sensing, on Yield and Yield Loss Due to Fruit Cracking. Available at SSRN 4654123. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4654123>
- Tezara, W., Urich, R., Jaimez, R., Coronel, I., Araque, O., Azocar, C., & Chacón, I. (2016). Does Criollo cocoa have the same exophysiological characteristics as Forastero?. *Botanical Sciences*, 94(3), 563-574. <https://doi.org/10.17129/botsci.552>
- Tosto, A., Morales, A., Rahn, E., Evers, J. B., Zuidema, P. A., & Anten, N. P. (2023). Simulating cocoa production: A review of modelling approaches and gaps. *Agricultural Systems*, 206, 103614. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2023.103614>
- Velasco-Muñoz, J. F., Aznar-Sánchez, J. A., Batlles-de-laFuente, A., & Fidelibus, M. D. (2019). Sustainable irrigation in agriculture: An analysis of global research. *Water*, 11(9), 1758.
- Villa-Cox, G., Cavazza, F., Jordan, C., Arias-Hidalgo, M., Herrera, P., Espinel, R., ... & Speelman, S. (2021). Understanding constraints on private irrigation adoption decisions under uncertainty in data constrained settings: A novel empirical approach tested on Ecuadorian Cocoa cultivations. *Agricultural Economics*, 52(6), 985-999.
- Wheeler, W. D., Black, B., & Bugbee, B. (2023). Assessing water stress in a high-density apple orchard using trunk circumference variation, sap flow index and stem water potential. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1214429>
- Zhang, Q., Chen, Y., Xiong, Y., Moritani, S., Wu, X., Yan, C., & Chen, X. (2021). Which Is More Sensitive to Water Stress for Irrigation Scheduling during the Maturation Stage: Grapevine Photosynthesis or Berry Size?. *Atmosphere*, 12(7), 845. <https://doi.org/10.3390/atmos12070845>

ISBN: 978-9942-22-607-5



9 789942 226075

F A S A

FONDO DE INVESTIGACIÓN PARA LA
AGROBIODIVERSIDAD, SEMILLAS Y
AGRICULTURA SUSTENTABLE



EL NUEVO
ECUADOR 

Instituto Nacional de
Investigaciones Agropecuarias



@iniapecuador



@iniapec



@iniapecuador

www.iniap.gob.ec