

AGRICULTURA 4.0

Cuándo, cuánto y cómo regar

Liliana Ríos-Rojas
Marysol Cano Benítez
Leonardo Castillo Sánchez
Mauricio Fernando Martínez

AGROSAVIA

EDITORIAL

AGROSAVIA

Corporación colombiana de investigación agropecuaria



FONTAGRO



ASORUT
Agricultura se Hace con Agua

AGRICULTURA 4.0

Cuándo, cuánto y cómo regar

Liliana Ríos-Rojas
Marysol Cano Benítez
Leonardo Castillo Sánchez
Mauricio Fernando Martínez

Alianzas AGROSAVIA

Agricultura 4.0: cuándo, cuánto y cómo regar. / Liliana Ríos-Rojas [y otros tres] – Mosquera, (Colombia): AGROSAVIA, 2024.

72 páginas (Colección Alianzas AGROSAVIA)

Incluye gráficos y tablas.

ISBN: 978-958-740-710-5

e-Book: 978-958-740-711-2

1. Agua 2. Nutrición de las plantas 3. Sistemas de riego 4. Manejo del suelo 5. Internet de las cosas 6. Tecnología agrícola. I. Ríos-Rojas, Liliana II. Cano Benítez, Marysol III. Castillo Sánchez, Leonardo IV. Martínez, Mauricio Fernando.

Palabras clave normalizadas según Tesauro Multilingüe de Agricultura - Agrovoc

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA)

Centro de Investigación Palmira. Diagonal a la intersección de la carrera 36A con calle 23, Palmira, Valle del Cauca. Código postal 763533, Colombia.

Esta publicación hace parte de los resultados de los trabajos de AGROSAVIA dentro del proyecto Fontagro “Nuevas tecnologías para el aumento de la eficiencia del uso del agua en la agricultura de ALC al 2030”, liderado por INIA-Chile, el cual aborda la modernización de los marcos conceptuales y las herramientas tecnológicas para aumentar la eficiencia del riego en países ALC.

Colección: Alianzas AGROSAVIA

Tipología: Manual

Fecha de recepción: 10 de noviembre de 2023

Fecha de evaluación: 28 de noviembre de 2023

Fecha de aceptación: 11 de diciembre de 2023

Primera edición: 1.000 ejemplares

Impreso en Bogotá, Colombia, febrero de 2024

Autores

Liliana Ríos-Rojas

Marysol Cano Benítez

Leonardo Castillo Sánchez

Mauricio Fernando Martínez

Preparación editorial

Editorial AGROSAVIA

editorial@agrosavia.co

Líder editorial: Astrid Verónica Bermúdez Díaz

Edición: Verónica Barreto Riveros

Corrección de estilo: Sebastián Montero Vallejo

Diseño y diagramación: Jaime Alexander Wilches Cañón

Impresión: DGP Editores

Citación sugerida: Ríos-Rojas, L., Cano-Benítez, M., Castillo-Sánchez, L., & Martínez, M. F. (2024). *Agricultura 4.0: cuándo, cuánto y cómo regar*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA).

<https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual.7407112>

Cláusula de responsabilidad: AGROSAVIA no es responsable de las opiniones ni de la información recogidas en el presente texto. Los autores asumen de manera exclusiva y plena toda responsabilidad sobre su contenido, ya sea este propio o de terceros, y declaran, en este último supuesto, que cuentan con la debida autorización de terceros para su publicación; igualmente, declaran que no existe conflicto de interés alguno en relación con los resultados de la investigación propiedad de tales terceros. En consecuencia, los autores serán responsables civil, administrativa o penalmente, frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros relativa a los derechos de autor u otros derechos que se hubieran vulnerado como resultado de su contribución.

El Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria (FONTAGRO) es un mecanismo único de cooperación técnica entre países de América Latina, el Caribe y España, que promueve la competitividad y la seguridad alimentaria. Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), FONTAGRO, de sus Directorios Ejecutivos ni de los países que representan.

Copyright © 2022 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial- SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional. Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.



Contenido

Agradecimientos	7
Introducción	8
Glosario	10
Capítulo I	
Importancia del agua	13
El agua y la nutrición de los cultivos	13
El agua y el crecimiento de las plantas	15
El proceso de fotólisis = aporte de energía	17
Capítulo II	
¿Para qué regar?	19
El suelo como fuente de agua para las plantas	19
Transpiración / ingreso de CO ₂	21
Pérdida de agua, evaporación + transpiración	22

Capítulo III

¿Cuándo regar? -----	24
El agua en el sistema suelo-planta-atmósfera -----	24
Medición en la atmósfera -----	24
Medición del estado hídrico de la planta -----	26
Medición del agua en el suelo -----	29
Prueba gravimétrica -----	31
Balance de agua en el suelo -----	33
Uso de sensores para determinar cuándo regar -----	34

Capítulo IV

¿Cuánto regar? -----	37
Profundidad de raíces (Pr) -----	37
Área de raíces (Ar) -----	39
Volumen de riego (Vr) -----	39

Capítulo V

¿Cómo regar? -----	41
Sistemas de riego -----	41
Goteo -----	41
Microaspersión -----	42
Ubicación del riego -----	42
Número de emisores -----	43
Tiempo de riego -----	45

Capítulo VI

Integración del sistema en red IoT	47
Estructura del sistema IoT	47
Operación de la red y uso de la información	49
Uso de la información de la plataforma-nube	51
Beneficios sociales y económicos del uso de tecnologías agricultura 4.0 e IoT	53

Capítulo VII

Recomendación tecnológica para los regantes	55
Cultivo	57
Disponibilidad hídrica en la fuente	57
Disponibilidad de riego localizado de alta frecuencia	57
Identificación de la profundidad de las raíces	58
Cuantificación de la CC	58
Periodo de calibración del riego	59
Instalación de tecnologías de agricultura 4.0 por tipo de suelo y de cultivo	60
Conexión de dispositivos a red IoT	61
Consulta mañana y tarde del estado de humedad del suelo	62
Cultivos que no poseen sistema de tecnologías en agricultura 4.0	64

Referencias	68
--------------------------	-----------

Los autores	70
--------------------------	-----------



Foto: Lilliana Ríos-Rojas

Agradecimientos

Los autores agradecen al Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria (Fontagro), por la financiación del proyecto “Nuevas tecnologías para el aumento de la eficiencia del uso del agua en la agricultura de ALC al 2030”, y al Instituto de Investigaciones Agropecuarias - INIA-Chile, por promover la participación de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) en el proyecto. También agradecen al equipo de la Oficina Asesora de Comunicaciones, Identidad y Relaciones Corporativas de AGROSAVIA, por el apoyo en el componente gráfico del documento, y a Julien Andrea Barreto Rojas, que hace parte del

proyecto y de otros resultados. A Visualiti SAS, por su generoso apoyo técnico y en tiempo real. Asimismo, agradecen y exaltan el apoyo fundamental del equipo técnico y administrativo de la Asociación de Usuarios del Distrito de Riego RUT (Asorut). Como parte de Asorut, agradecen con mención especial a los productores participantes del componente experimental, quienes facilitaron el acceso a sus cultivos y colaboraron durante todo el proceso. Finalmente, a la profesional María Sandra Giraldo, que se destacó por su apoyo técnico. Del mismo modo, al editor Héctor Hernández, por su apoyo con el material audiovisual.



Introducción

En América Latina, un alto porcentaje de la población agrícola no cuenta con mecanismos eficientes de extracción, conducción y disposición de agua, lo que genera altos costos de producción, ambientales y económicos. Al respecto, son insuficientes los sistemas de control en el consumo del agua que permitan una correcta regulación en el uso tradicional del riego, ya que tradicionalmente el líquido se consume de manera indiscriminada (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2018). Algunos países están adoptando estrategias de conectividad rural para que los productores cuenten con medios para el monitoreo y la captura de información en los cultivos, y permitir así el control en tiempo real. De este modo, se pretende acercar el uso de tecnologías a los agricultores y garantizar que estos tengan “más ingresos y calidad de vida, generando impactos positivos para toda la sociedad” (Sotomayor et al., 2022).

Se espera que el uso de tecnologías 4.0 permita hacer un monitoreo detallado de los cultivos y del sistema productivo en tiempo real, al “conectar” las fincas y permitir un mayor control y administración de los recursos productivos. Asimismo, se busca aprovechar el internet de las cosas (IoT, por su sigla en inglés) para transmitir y almacenar información que servirá de apoyo en la toma de decisiones. Dentro de los beneficios de las tecnologías 4.0, Olakunle et al. (2018) mencionan su potencialidad para promover la agricultura comunitaria, lo que genera interacción entre agricultores, asesores y expertos en agricultura.

En la actualidad, la cobertura de riego en Colombia representa solo el 6 % de las 18,4 millones de hectáreas cultivadas. Esto se debe, en parte, a que la inversión pública sectorial se ha concentrado en el fortalecimiento institucional y en los apoyos directos, en detrimento de la provisión de bienes y servicios públicos sectoriales (DNP, 2019). De este modo, solo el 5,2 % de las unidades productivas en el país están tecnificadas (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales



Foto: Héctor Hernández

[Ideam], 2019) —esto referido a cultivos con alta rentabilidad, como es el caso de las flores y los cereales—. Al año 2019, en Colombia solo se reportaban 30 casos de aplicaciones de redes inalámbricas con sensores de campo acopladas a arquitecturas IoT en procesos agrícolas (Tovar et al., 2019).

En este contexto, incursionar en la agricultura 4.0 acoplada a tecnologías IoT hará la diferencia: permitirá el cambio de paradigma y así mejorará la gestión de los recursos productivos desde la pequeña escala, a nivel de finca. Para el caso de esta publicación, se pretende aportar en la gestión del agua, para dar respuesta a la cuestión de cuándo, cuánto y cómo regar, específicamente para los usuarios del distrito de riego RUT (Roldanillo, La Unión y Toro, en el departamento del Valle del Cauca, Colombia), partiendo de información medida en el sitio, de manera continuada y en tiempo real.

Este manual técnico hace parte de los resultados del piloto Colombia del proyecto Fontagro “Nuevas tecnologías para el au-

mento de la eficiencia del uso del agua en la agricultura de ALC al 2030”, liderado por INIA-Chile. El proyecto plantea la modernización de los marcos conceptuales y de las herramientas tecnológicas para aumentar la eficiencia del riego en países de América Latina y el Caribe (ALC).

El diagnóstico local realizado indica que la mayoría de los productores utilizan el riego empíricamente, sin criterios sobre la eficiencia en el uso del agua o de los fertilizantes, lo que contribuye al deterioro de la calidad del suelo (salinización) y afecta, de paso, la productividad.

Adicionalmente, se observan cambios en los balances hídricos locales y, por tanto, en la disponibilidad de agua de riego, lo cual obliga a la administración del distrito y a los entes gubernamentales ambientales a tomar acciones en pro del uso y el manejo responsables de este recurso. Este manual pretende dar pautas y motivar a la comunidad involucrada en la actividad del riego de cultivos para que utilice herramientas de agricultura 4.0 acopladas a tecnologías IoT, con miras a mejorar la gestión del agua.

Glosario

Agricultura 4.0: sistemas de medición, transferencia y uso de información en tiempo real, para la toma de decisiones oportunas en la agricultura (Zambon et al., 2019).

Capacidad de almacenamiento del agua en el suelo: por definición, es el contenido de humedad entre la capacidad de campo y el punto de marchitez. Para el caso de investigación, se trata del agua que se encuentra entre los límites de riego: 80-64 % de la capacidad de campo.

Capacidad de campo (CC): contenido de humedad en el suelo en el cual las plantas se encuentran con alta disponibilidad de agua y en estado de confort hídrico.

Conductancia estomática: medida indirecta de la pérdida de agua desde la planta, que cuantifica la apertura de estomas por unidad de superficie foliar.

Contenido gravimétrico de agua: peso del agua en una muestra de suelo.

Contenido volumétrico de agua: peso del agua en una muestra de suelo multiplicado por la densidad aparente.

Internet de las cosas (IoT, por su sigla en inglés): uso de sensores y otros dispositivos conectados a internet que permiten convertir cada elemento y acción involucrada en la agricultura en datos para la toma de decisiones. En el presente estudio se conectaron varias fincas (cultivos) que formaron una red IoT para el distrito de riego RUT.

Sensor de humedad tipo capacitancia: sensor dieléctrico que mide el contenido de humedad en el suelo usando la constante dieléctrica del agua. Entre más agua hay en el suelo, más rápido se transmite una señal eléctrica, y viceversa.

Turgencia: estado en el que se presenta una célula debido a la presión ejercida por un fluido interno.





Foto: Eliana Ríos-Rojas



Foto: Liliana Ríos-Rojas

Capítulo I

Importancia del agua

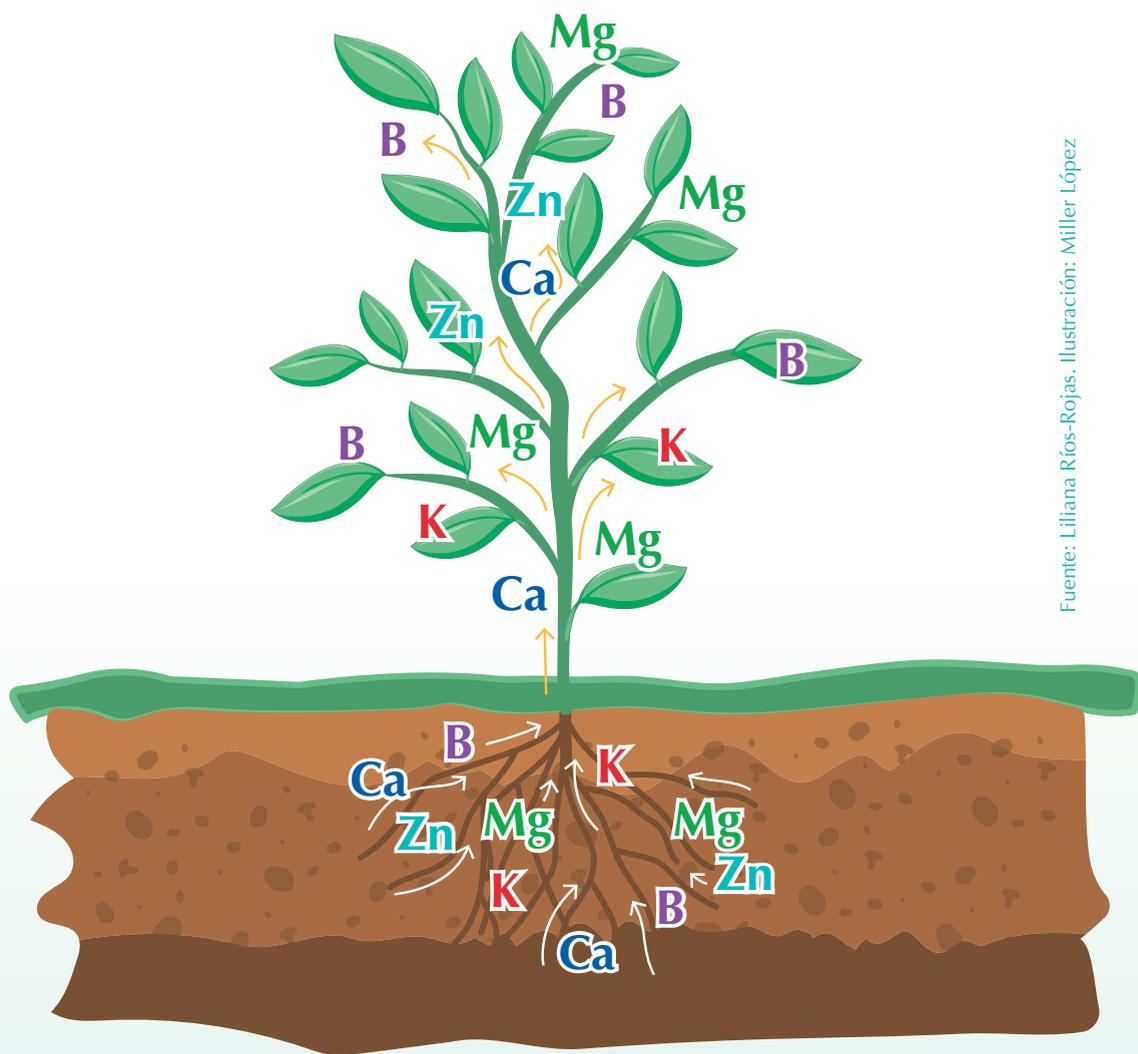
El agua y la nutrición de los cultivos

La composición química y los atributos físicos del agua la convierten en el solvente universal. La disposición dipolar de la molécula de agua a partir de las cargas del oxígeno (negativo) y del hidrógeno (positivo) permite una alta atracción con otras moléculas o solutos, para actuar como un excelente solvente (Aguilera, 2020). Cuando hay muchas más moléculas de agua en relación con el soluto, es decir, con una solución acuosa, se forma alrededor del soluto una capa de hidratación: esto posibilita la dispersión (distribución) uniforme de partículas en el agua.

Es así como, dondequiera que vaya el agua, ya sea a través del aire, el suelo o nuestros cuerpos, llevará consigo sustancias químicas, minerales y nutrientes valiosos (Water Science School, 2008). Esta capacidad de transportar sustancias disueltas le permite al agua aportar en la nutrición de los organismos y, en este caso, de las plantas.

Los fertilizantes disueltos en el agua son absorbidos por las raíces y ascienden a través del xilema como consecuencia de la corriente transpirativa, y pasan a ser parte estructural de los tejidos de las

plantas (Melgarejo, 2010). Nutrientes como hierro, azufre, cloro, boro y molibdeno son absorbidos como fosfatos, sulfatos, cloruros, boratos y molibdatos, mientras que otros nutrientes son absorbidos bajo la forma de cationes de K^{1+} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Fe^{2+} o Fe^{3+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} y Cu^{2+} . El nitrógeno, por su parte, es absorbido bajo la forma de NO_3^- , NO_2^- o NH_4 (Guardiola & García, 1999) (figura 1).



Fuente: Liliana Ríos-Rojas. Ilustración: Miller López

Figura 1. Diagrama de absorción de nutrientes.



Foto: Héctor Hernández

El agua mezclada con sales minerales, reguladores de crecimiento y otras sustancias disueltas forma la savia bruta, que se mueve por diferencias de potencial hídrico y químico a través del xilema de las plantas hasta llegar a las hojas (Margulis & Sagan, 2012). La mayor parte del agua interna de las hojas es transportada hacia la atmósfera en la transpiración. En este proceso, la atmósfera, con menor concentración de agua que el interior de las hojas, genera un déficit de presión de vapor (DPV) que induce al agua a salir a través de los poros (estomas) hacia el medio circundante de la hoja. De este modo, la tasa de trans-

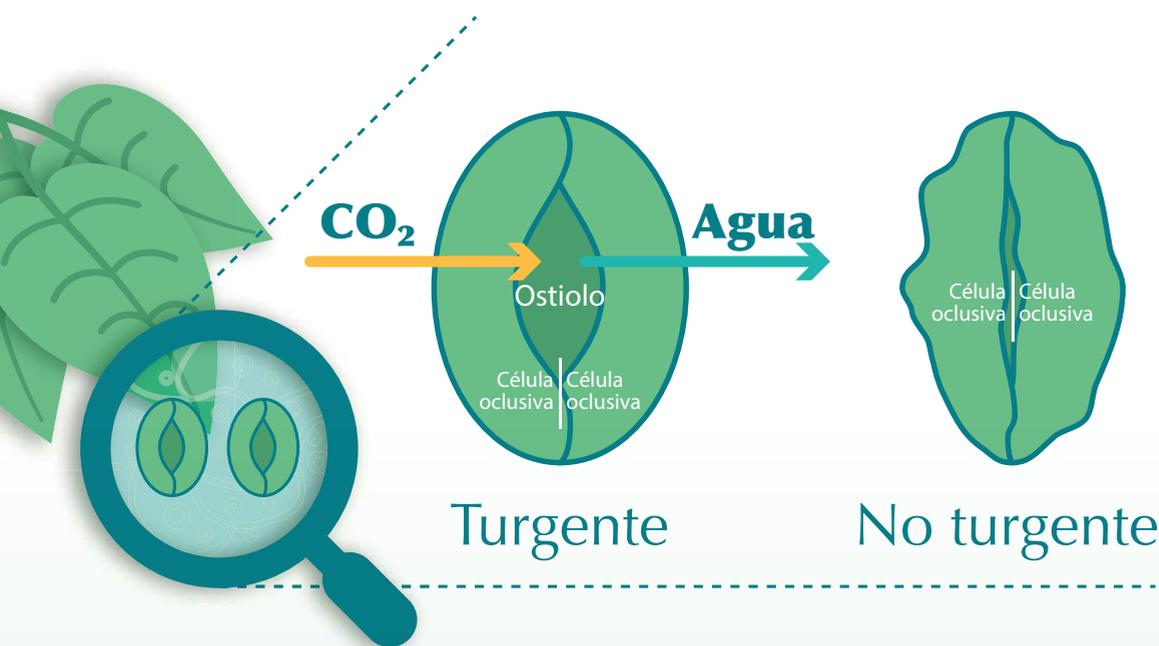
piración de las plantas dependerá tanto del gradiente planta-atmósfera como del contenido interno de agua en las hojas y, por lo tanto, de la disponibilidad de humedad en el suelo. Si, por el contrario, la atmósfera está húmeda y, por ello, este gradiente es pequeño, la tasa de transpiración será baja (Tejada, 2018).

El agua y la productividad de las plantas

Como se indicó, por acción de la transpiración, el agua asciende por el xilema de las plantas y genera un flujo continuo, lo

cual permite que el sistema se mantenga lleno de agua y, por tanto, turgente. Esta turgencia desencadena un mecanismo de tensión/relajación celular que genera elongación de la célula y, en su conjunto, de los tejidos, es decir, crecimiento. Este estado es propio de todo el conjunto de tejidos, desde la raíz hasta las hojas. Cuando una hoja está turgente, las células oclusivas, que conforman el estoma,

permiten su apertura y, así, el intercambio gaseoso con la atmósfera (Chen, 2021). Si esta turgencia se pierde, el orificio estomático (ostiole) se cierra, lo que impide la pérdida excesiva de agua (figura 2). La apertura y el cierre también responden a cambios en la luminosidad, al déficit de presión de vapor, a la concentración de CO_2 y a la humedad del suelo, entre otros factores (Henry et al., 2019).



Fuente: Diseño: Liliana Ríos-Rojas. Ilustración: Jaime Wilches

Figura 2. Esquema de turgencia de un estoma.

Así, se debe procurar mantener los estomas abiertos, es decir, generar turgencia, para que la capacidad de captura de nutrientes del suelo y de la atmósfera (CO_2), así como la elaboración de savia

bruta, se mantengan activas. Esto es especialmente importante en cultivos comerciales, en los que la retribución económica depende de un menor tiempo de cosecha y del rendimiento del producto.

El proceso de fotólisis = aporte de energía

La fotólisis es el proceso mediante el cual la molécula de agua se fracciona, por acción de la luz, en dos átomos de hidrógeno (H^+), un átomo de oxígeno (O) y dos electrones. En este caso, los H^+ pasan a formar parte de la molécula energética NADPH y a regular el pH del sistema lumen/estroma. El átomo de O se unirá a otro

para formar una molécula de oxígeno (O_2), y los dos electrones pasarán a la cadena transportadora para proveer energía destinada a la formación de NADPH y ATP, moléculas energéticas que son usadas en la fase oscura para la construcción de carbohidratos (Urry et al., 2021). Un esquema del proceso se relaciona en la figura 3.

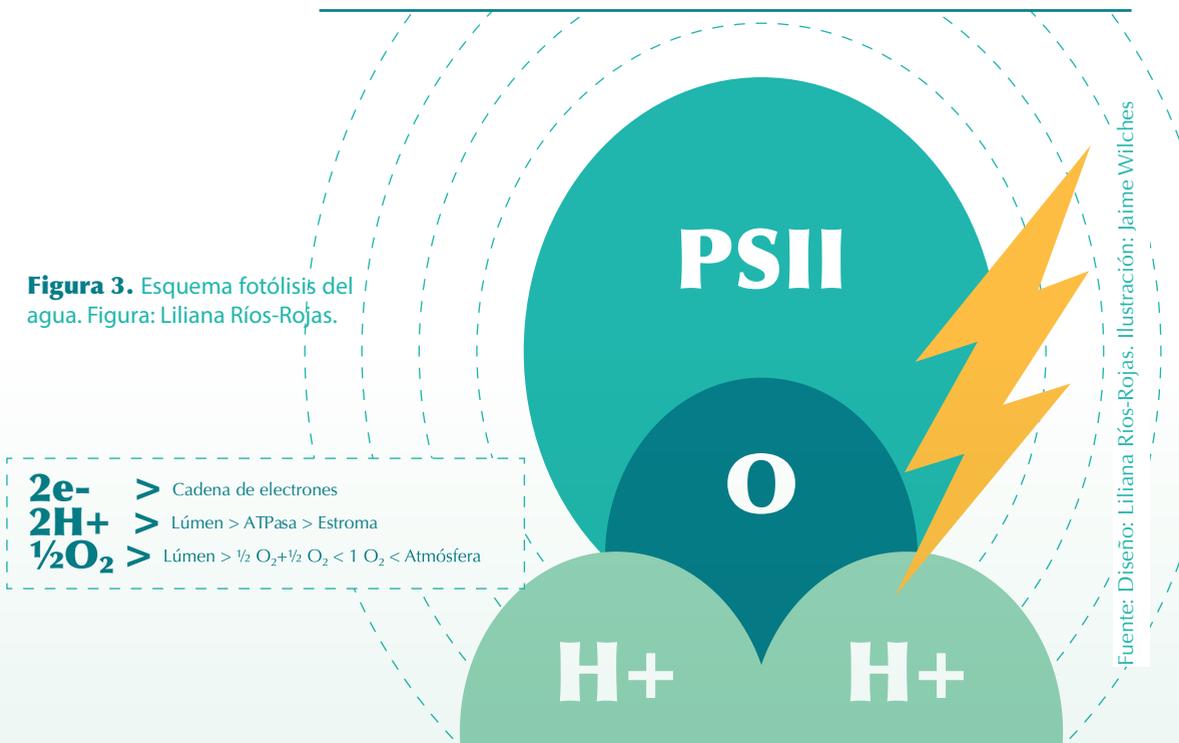


Figura 3. Esquema de la fotólisis del agua.



Foto: Liliana Ríos-Rojas

Capítulo II

¿Para qué regar?

El suelo como fuente de agua para las plantas

El suelo es el que provee agua a los cultivos; es el almacén de agua. De nada sirve a las plantas que haya un río o una quebrada cercana si al suelo no le llega agua. Esta se almacena en el suelo con aporte meteórico (con la lluvia), con el riego o con los flujos subsuperficiales, debido a la capilaridad o a las corrientes subsuperficiales.

Gracias a sus propiedades iónicas, el suelo permite la adherencia de las moléculas de agua a su matriz. Por ser un medio poroso, posibilita el almacenamiento en los microporos, y, a través de los macroporos, el movimiento o el flujo del agua (Organización de las Na-

ciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2009). Claramente, entre más microporosidad, más almacenamiento: este es el caso de los suelos arcillosos. En suelos arenosos, dado que hay mayor volumen de macroporos, se privilegia el flujo, por lo cual hay un almacenamiento diferencial, de acuerdo con la textura del suelo.

Así como hay una influencia de la textura, también la profundidad del suelo es importante en la capacidad de almacenamiento. Entre mayor espesor tenga la capa arcillosa, mayor será el almacenamiento de agua, en el tiempo y en el espacio (Zotarelli et al., 2019).



Foto: Héctor Hernández

De nada sirve una fuente de agua si el fluido no llega hasta el suelo del cultivo y se almacena en este. En tal sentido, el agua es requerida para la nutrición, la turgencia y el aporte de energía para las plantas. Por esto, se debe regar cuando no haya suficiente aporte de agua,

es decir, regar es completamente necesario. Se riega para mantener el almacenamiento, suplir las necesidades de la planta y, así, conservar los estomas abiertos. Entonces, cuando el suelo posee adecuado almacenamiento de agua,

cuando está cercano o muy cercano a capacidad de campo (CC), la planta cuenta con un vehículo continuo de nutrientes, el aporte de energía para la fase oscura está garantizado y se mantiene la turgencia de las células oclusivas, y, en consecuencia, los estomas permanecen abiertos.

Transpiración / ingreso de CO₂

Se riega para dar continuidad a la transpiración: para que ingrese agua por la raíz y se pierda por el estoma hacia la atmósfera y, en consecuencia, entre CO₂. Con los estomas abiertos se garantiza el acceso de CO₂ a la fase oscura (ciclo de Calvin), para seguir con la construcción de carbohidratos, lo cual permite el desarrollo de tejido nuevo para la

planta, esto es, producción de hojas, raíces, frutos, semillas, etc.; crecimiento, y desarrollo de la planta. Asimismo, esta apertura permite la continuidad del flujo del agua y de la savia bruta. Todo ello contribuye a la producción (figura 4). Se entiende de esta manera que, si no hay agua en el suelo, la producción se afecta negativamente.



Fuente: Diseño: Liliana Kíos-Rojas. Ilustración: Jaime Wilches

Figura 4. Esquema fisiológico funcional.

Pérdida de agua, evaporación + transpiración

Con el adecuado nivel de humedad en el suelo, los estomas se mantienen abiertos, mientras haya luz. Esto implica que hay continuidad en el ciclo del agua. Esta se capta por la raíz, va a través de la planta, se pierde por las hojas y pasa a la atmósfera. Dicha pérdida es tan intensa como lo requiera el ambiente. Una atmósfera seca demandará más agua que una atmósfera húmeda. Esta demanda es suplida, además, por el agua que se evapora directamente del suelo, la cual, en conjunto con el agua perdida por las hojas, se denomina evapotranspiración.

La pérdida de agua por transpiración no es un proceso alternativo, la planta debe transpirar para mantenerse funcional. Sin embargo, cuando el suelo está seco o con muy poca humedad, la respuesta de

la planta, para evitar la deshidratación, es cerrar los estomas. El cierre de estomas, como es claro, no beneficia el proceso productivo. Por el contrario, si el suelo está húmedo, hay continuidad en la transferencia de agua hacia la atmósfera y, por ende, acceso de CO_2 .

Las plantas se han adaptado y han desarrollado estrategias para escapar de la deshidratación en zonas con alta demanda atmosférica de agua y poco aporte al suelo, entre ellas minimizar el área foliar, reducir el número de estomas por cm^2 , rotar el limbo y evitar la proyección directa de la radiación en las hojas por medio del crecimiento vertical de ramas.

La evaporación sucede en el suelo o desde cuerpos de agua libre. En el suelo,

agota de manera importante el agua libre de los macroporos, sobre todo en los primeros centímetros de profundidad. En atmósferas demandantes, las plantas con poca profundidad radical sufren consecuencias graves de deshidratación en el corto plazo, si el agua no se repone rápidamente. En suelos desnudos, la evaporación es más rápida que en suelos con cobertura.

Es necesario considerar el objetivo del riego antes de instalar el sistema, para no humedecer sitios que no posean cultivo, tales como calles y canales. El agua que se aplica en estos sitios se pierde rápidamente por evaporación y contribuye a la proliferación de arvenses.



Foto: Liliana Ríos-Rojas

Capítulo III

¿Cuándo regar?

El agua en el sistema suelo-planta-atmósfera

El agua se mueve a través del sistema suelo-planta-atmósfera (SPA). El líquido es tomado por las raíces, conducido a través de la planta por los vasos conductores —o xilema— hasta las hojas, desde donde sale a la atmósfera en forma de vapor a través de los estomas, y retorna al suelo a través de la lluvia, el riego o desde fuentes subterráneas. El agua que se mueve a través del sistema SPA puede ser medida. Saber cómo hacerlo es importante, ya que con esta información se pueden tomar decisiones de riego, nutrición y manejo sanitario.

Medición en la atmósfera

La atmósfera genera consumo de agua para la planta. Entre más seca la atmósfera, mayor extracción de agua en la fuente: el suelo. Cuando la atmósfera está muy seca, los estomas se cierran y disminuye tanto la pérdida de agua como el acceso de CO_2 . La variable atmosférica que gobierna la apertura o cierre de los estomas se denomina déficit de presión de vapor (DPV). Esta variable es cuantificada con la temperatura ambiente (T°) y la humedad relativa (HR). Por lo anterior, para determinar la demanda de agua por la atmósfera, se requiere un termómetro para medir

T° máx. y T° min., que, promediadas, entregan la T° media, así como un barómetro para medir la HR. Cuando la atmósfera está húmeda, el DPV está alrededor de 0,5; en condición seca, el DPV se acerca a 2,0. La precipitación, la velocidad del viento y la radiación también pueden ser medidas y para ello se emplean, respectivamente, el pluviómetro, el anemómetro y el radiómetro. En conjunto, todos los sensores de mediciones atmosféricas forman una estación meteorológica automática (EMA), cuyos componentes se esquematizan en la figura 5.

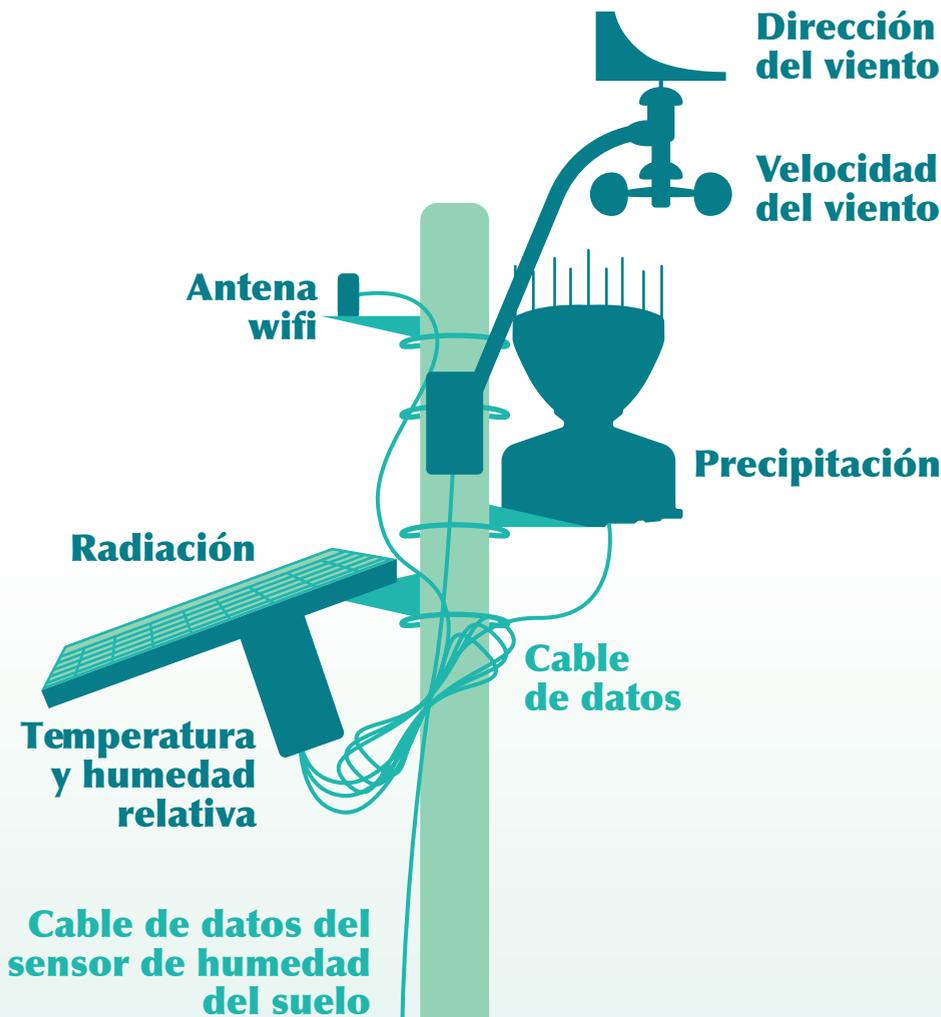


Figura 5. Esquema de una EMA.

Ilustración: Jaime Wilches



Foto: Claudia Narváez

Medición del estado hídrico de la planta

Para medir el estado hídrico de la planta, se usan técnicas de fitomonitorio, las cuales pueden ser ejecutadas con sensores electrónicos y de operación manual. La mayoría de las veces, este seguimiento no es continuo a pequeña escala del tiempo y mucho menos si el registro es manual. Un ejemplo de una variable importante para validar el estado hídrico de la planta, y que normalmente tiene un registro no continuo, es la temperatura de la hoja. Esta variable se mide con un termómetro infrarrojo. La temperatura actúa como un indicador de la apertura estomática. Como ya se

ha indicado, los estomas se cierran si la planta sufre estrés por déficit hídrico. Ahora bien, si la hoja presenta una alta temperatura, es indicador de que los estomas están cerrados. Una temperatura normal, bajo 24 °C, indica que los estomas están abiertos, con lo cual la planta se mantiene refrigerada.

La apertura estomática también se puede monitorear con un porómetro, el cual registra el flujo de agua a través de los estomas en una sección específica de la hoja. Este registro, en condición de finca, es discreto o pun-

tual, ya que no existe un sensor para hacerlo de manera continuada. El estado hídrico de la hoja o potencial hídrico puede ser medido con una cámara de Scholander, la cual registra la presión que ejerce el agua en el xilema en determinado momento del día o el estado de turgencia del tejido. Dada la complejidad de la medición, este equipamiento y dichas técnicas son usados solo en condiciones de investigación y son igualmente puntuales, no continuos. En la figura 6 se presenta una medición con porómetro.



Foto: Claudia Narváez

Figura 6. Sensores de medida no continua en el tiempo: porómetro.

Por otra parte, equipos para mediciones continuas son preferidos por los productores. Para el caso, se usan los dendrómetros, que miden el desarrollo de la planta mediante el diámetro de una estructura: tallos y frutos. El diámetro es altamente sensible al estado hídrico de la estructura y, por

ello, puede ser indicador del estado hídrico de la planta (figura 7). También existen sensores que miden la dinámica de la turgencia en las hojas, utilizando imanes que se ubican en el haz y el envés. Todos ellos son sensores electrónicos, acoplados a un almacenador de datos.



Foto: Liliana Ríos-Rojas

Figura 7. Sensores de medida continua.

Mediciones que dependen del usuario y que, por su sencillez, pueden tener mayor regularidad, pero menor precisión, se refieren al diámetro del fruto o de

cualquier estructura de la planta determinado con un calibrador digital o análogo. En la figura 8 se presentan algunos de estos equipamientos y técnicas.



Fotos: Liliana Ríos-Rojas

Figura 8. Medición manual del diámetro del fruto. a. Guanábana; b. Lima Tahití; c. Papaya.

Medición del agua en el suelo

El contenido de agua en el suelo determina la capacidad de su movimiento en el medio poroso. Si la lámina que ingresa (por precipitación o riego) excede la capacidad de almacenamiento, el agua puede moverse en profundidad o lateralmente. Si no hay excedencia, se puede quedar

almacenada, por acción de las fuerzas matriciales y en contra de la gravedad. En cualquiera de los casos, se puede perder hacia la atmósfera por acción de la evaporación desde el suelo o transpiración desde las plantas. En la figura 9 se esquematizan estos procesos.



Figura 9. Agua en el suelo.

Para medir el agua que se queda efectivamente almacenada, y que es la que interesa con fines agrícolas y de riego, se tienen algunas opciones: sensores tipo capacitancia, tensiómetros y cápsulas de yeso. Esta publicación recomienda la medición con sensores de humedad tipo capacitancia, que informan el estado

de humedad del suelo en unidades de volumen, es decir, en términos del volumen ocupado por el agua respecto del volumen total de suelo. Por ejemplo: se requiere regar un árbol frutal, que ocupa un área superficial de $4,5 \text{ m}^2$, lo que significa que tiene $1,2 \text{ m}$ de radio en el plato (figura 10).

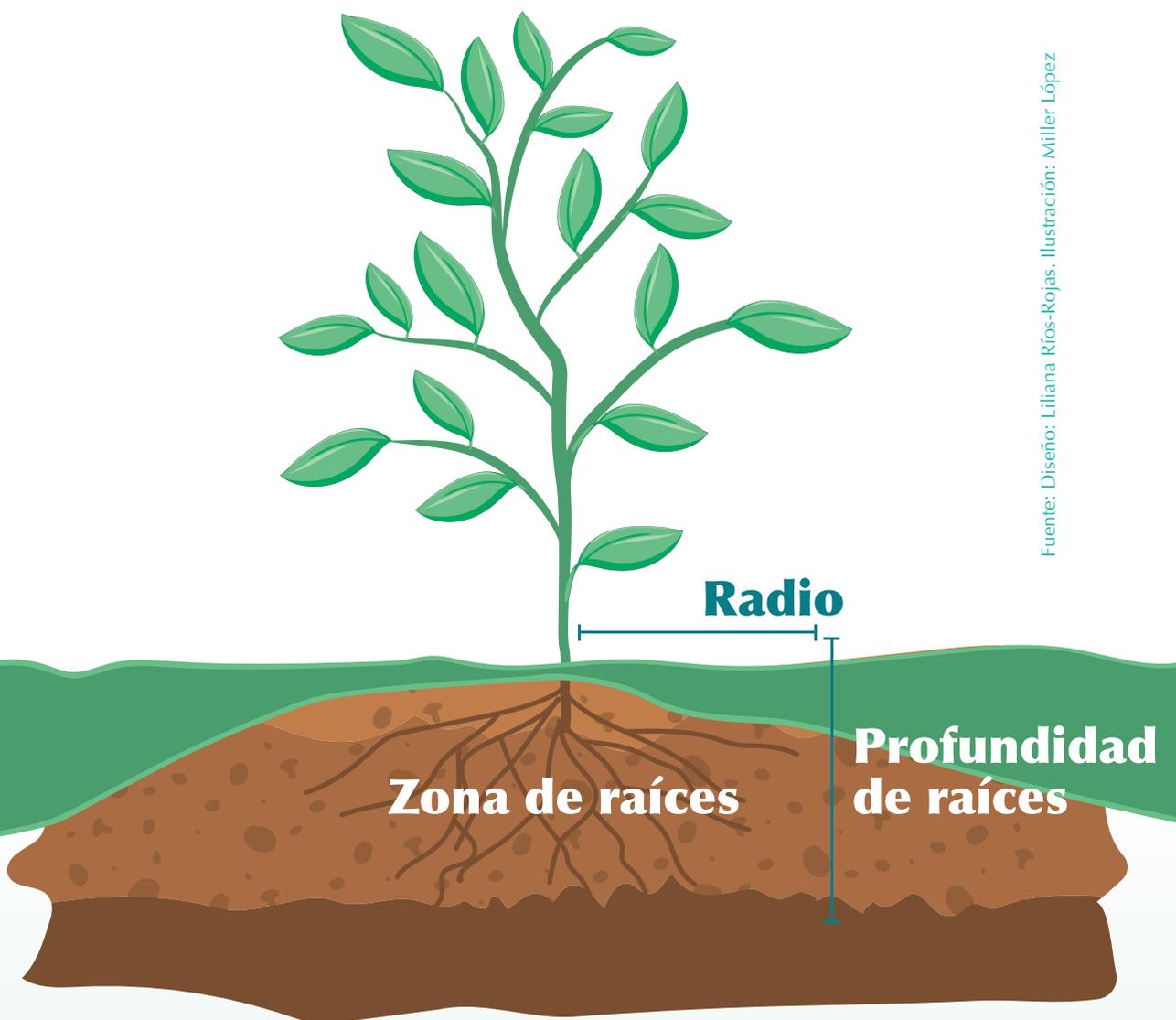
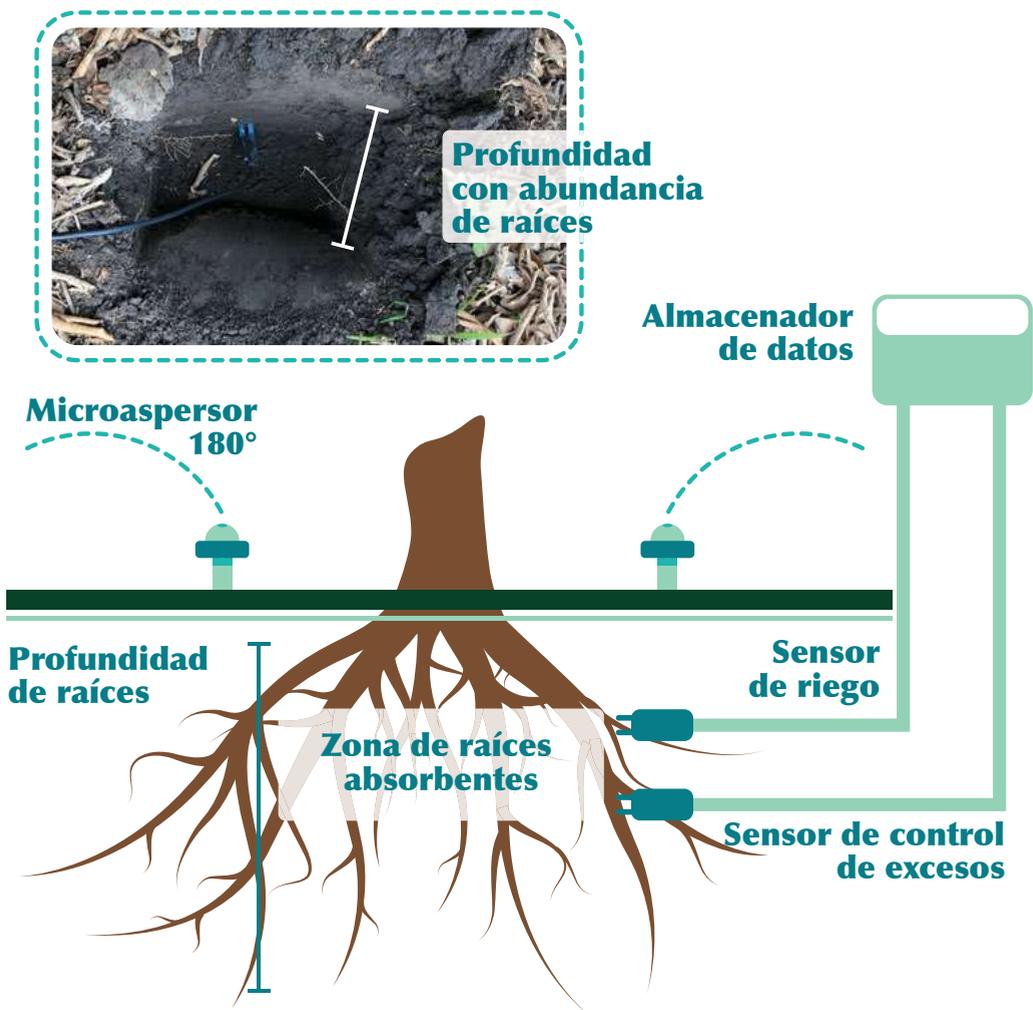


Figura 10. Esquema del volumen ocupado por raíces.

La profundidad de las raíces es de 0,4 m, por lo tanto, el volumen que ocupan las raíces es de $1,8 \text{ m}^3$. Si el sensor indica que la humedad del suelo es de $0,37 \text{ m}^3/\text{m}^3$, esto quiere decir que el 37 % del volumen que ocupan las raíces es agua. En la figura 11 se muestra la ubicación de un sensor de capacitancia.



Fuente: Diseño: Liliana Ríos-Rojas. Ilustración: Jaime Wilches. Foto: Liliana Ríos-Rojas

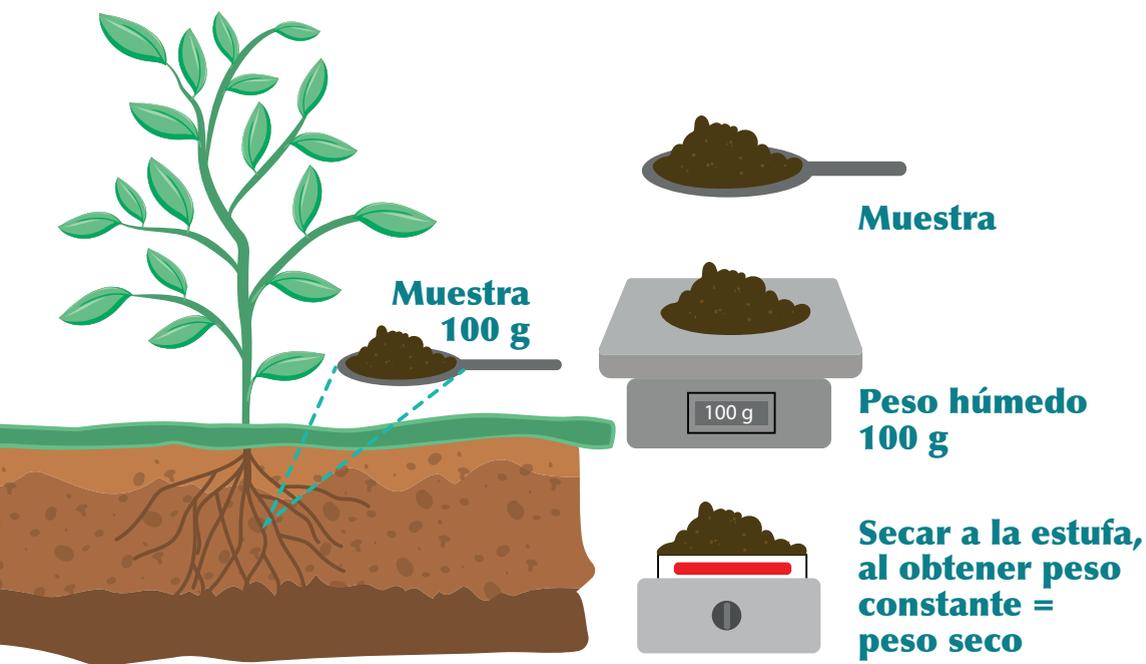
Figura 11. Esquema de ubicación de un sensor de capacitancia.

Prueba gravimétrica

Otro método para medir el agua en el suelo y que implica un poco más de operatividad por parte del productor es la prueba gravimétrica. Para aplicarla, el productor debe conocer previamente la densidad aparente (Da) del suelo. La prueba parte de la extracción de una muestra de suelo

(puede ser de 100 g). La muestra debe ser pesada, inmediatamente después de extraída, para evitar la pérdida de humedad. Este peso se denomina peso húmedo (Ph). La porción de suelo se seca exponiéndola a una fuente de calor, que puede ser un horno o una estufa, por sobre los 100 °C. Se deja

un tiempo determinado en la fuente de calor y se pesa. Este peso se denominará peso seco (Ps). El proceso de secado se repite tantas veces como sea necesario para llegar a un peso constante, lo cual debe suceder durante las últimas tres pesadas. En la figura 12 se esquetiza el procedimiento.



Fuente: Diseño: Liliana Ríos-Rojas. Ilustración: Miller López

Figura 12. Esquema de la prueba gravimétrica.

Para determinar el contenido de humedad en el suelo, se aplica:

$$U = [(Ph - Ps)/Ps] * 100 \text{ (ecu. 1)}$$

Hasta este momento se tiene el contenido de humedad con base en el peso (g/g). Para convertirlo a volumen (cm^3/cm^3), se debe multiplicar por la D_a ($\text{g} * \text{cm}^3$), esto es, contenido de humedad del suelo:

$$(\varnothing) = U * D_a \text{ (ecu. 2)}$$

Ahora, un ejemplo: peso de la muestra sacada en el campo, $Ph = 100 \text{ g}$; peso muestra a peso constante, $Ps = 81 \text{ g}$, $D_a 1,3 \text{ g} * \text{cm}^3$.

$$U = [(100 - 81)/81] * 100 = 23,4$$

$$(\varnothing) = U * D_a = 23,4 * 1,3 = 30,5 \%$$

El resultado indica que, del volumen total ocupado por las raíces, el agua ocupa un 30,5 %.

Ahora bien, continuando con el ejemplo, si el volumen del suelo es de $1,8 \text{ m}^3$, $0,55 \text{ m}^3$ son ocupados por agua, o también podríamos decir que en ese espacio caben 550 l de agua.

Balance de agua en el suelo

El suelo debe contener un adecuado volumen de humedad para garantizar un óptimo desarrollo de la planta. Este contenido de humedad está en completo equilibrio con el contenido de sólidos y de aire dentro de la matriz del suelo. En este caso, el suelo está a CC. Es decir, la planta tiene adecuado anclaje, agua y aire para todas sus funciones. No hay exceso que impida la respiración, y no hay déficit que impida el intercambio gaseoso con la atmósfera.

Para suelos arenosos, la CC está en alrededor de 0,1 bar; para suelos francos, en 0,33 bar, y para las arcillas, entre 0,33 bar y 0,5 bar. En este caso, los “bares” son la presión con la que está contenida, en el suelo, el agua en equilibrio. A menor contenido de agua (suelo seco), mayor presión, y, en un suelo saturado o inundado, menor presión.

Ahora bien, como convención de riego, se define que, para suelos arenosos y francos, la humedad en el suelo se debe mantener a capacidad de campo. No es así para suelos arcillosos, ya que estos pierden rápidamente su estructura, por factores mecánicos o químicos (sales), lo que minimiza el contenido de aire. Tal como se ha mencionado, el contenido de aire es requerido para procesos fisiológicos importantes, como la respiración. En las plantas, respirar es un proceso que aporta energía. Así, en arcillas

es recomendable privilegiar la aeración manteniendo el suelo, como límite máximo de humedad, a 80 % CC.

Así, conociendo el contenido de humedad al que se debe mantener el suelo, es necesario hacer un monitoreo continuo para identificar el agotamiento y cuantificar la reposición, esto es, para regar.

El balance hídrico, como cualquier balance, es la relación entre las entradas y las salidas. De acuerdo con Allen et al. (1998) (ecu. 3), el contenido de humedad en el suelo (ΔS) cambia en función de las entradas —precipitación (P), riego (R)— y las salidas —evapotranspiración (ETo), escurrimiento superficial (Esc) y recarga (Rec)—.

$$\Delta S = P + R - ETo - Esc - Rec \text{ (ecu. 3)}$$

Cuando se riega sin excesos, Esc y Rec dejan de ser importantes en el balance.

La ETo es tomada directamente de la EMA. La interfaz de visualización de datos entrega estos valores, calculados a partir de la ecuación de Penman-Monteith (Allen et al., 2006).

Ahora bien, el contenido ΔS puede ser medido directamente, tal como se explicó en la sección anterior, por sensores de capacitancia o haciendo una prueba gravimétrica. Con esta medición se puede identificar, en tiempo real, qué contenido de humedad tiene el suelo y decidir si regar o no.



Foto: Liliana Ríos-Rojas

Uso de sensores para determinar cuándo regar

Esta sección será desarrollada con un ejemplo. Tal como se ha indicado, el sensor de capacitancia informa la humedad en el suelo como un porcentaje, es decir, cuánto de ese suelo corresponde a agua. Entendiendo que la humedad ideal es de 100 % CC para suelos arenosos y francos, y de 80 % CC para suelos arcillosos, se compara la humedad indicada por el sensor con el valor de CC. Es importante, además, mencionar que en riego se define un límite mínimo de contenido de humedad para volver a regar. Para suelos arenosos y francos, este límite no existe, se deben mantener en 100 % CC, dada la rapi-

dez con la que pierden agua. Pero no funciona así para suelos arcillosos. De acuerdo con Luo y Zhou (2006) y Zhao et al. (2020), este límite puede llegar a ser hasta de 60 % CC, nivel hídrico en el que no se alteran los procesos biológicos ni el intercambio gaseoso en el suelo. Sin embargo, este parámetro depende de la especie y del ambiente. De acuerdo con investigaciones desarrolladas por AGROSAVIA, este límite, en suelos arcillosos, se toma como el 64 % CC. Es decir que se vuelve a regar cuando se haya consumido el 36 % CC. Esto es, dejar que se consuma solo el 20 % de ese límite máximo al que se debe mantener el suelo (80 % CC).

Ejemplo: se tiene un suelo arcilloso con $CC = 42\%$. Este valor ha sido previamente entregado por un laboratorio de física de suelos, determinado por la prueba denominada curva de retención de humedad. El sensor indica que el suelo se encuentra con un 26% de humedad. Dado que el suelo se debe mantener a 80% CC, es decir, $33,6\%$, haría falta reponer un $7,6\%$ para cumplir con el parámetro de humedad óptima del suelo. Pero surge la siguiente pregunta: ¿el suelo está en déficit para la planta con este 26% ? Con el fin

de responder, hace falta calcular el límite mínimo de humedad para volver a regar. Siendo 64% CC, este parámetro de riego se calcula, y es igual a $26,88$; se verifica que la humedad ya está por debajo del límite mínimo y se debe volver a regar. Ahora, ¿cuánto regar? Se riega hasta llegar a 80% CC, que es igual a $33,6\%$, es decir, se debe reponer $7,6\%$. El suelo debe alcanzar el límite máximo u óptimo de humedad. Lo anterior plantea otra pregunta: ¿cómo se repone esa humedad? Lo resolveremos en el siguiente capítulo.



Foto: Claudia Narváez



Foto: Liliana Ríos-Rojas



Capítulo IV

¿Cuánto regar?

Profundidad de raíces (Pr)

En el capítulo anterior se dejó una pregunta planteada: ¿cómo reponer el agua que hace falta? —esto es, el agua que hace falta en el sitio de las raíces—. Tal como se indicó anteriormente, el productor debe conocer la profundidad de las raíces de su cultivo para

hacer un riego adecuado, eficiente y suficiente. Con ello, logra conocer todo el ambiente donde las raíces se desarrollan. La mejor manera de explorar este ambiente es construir una calicata (figura 13). Se trata de una excavación justo en la periferia del plato, en la

“gotera” del árbol, y que, se recomienda, sea de 1 m * 1 m * 1 m, o del tamaño que se prefiera, siempre y cuando se vean bien las raíces en profundidad (figura 13). En este sitio se identifica la sección con mayor abundancia de raíces funcionales.

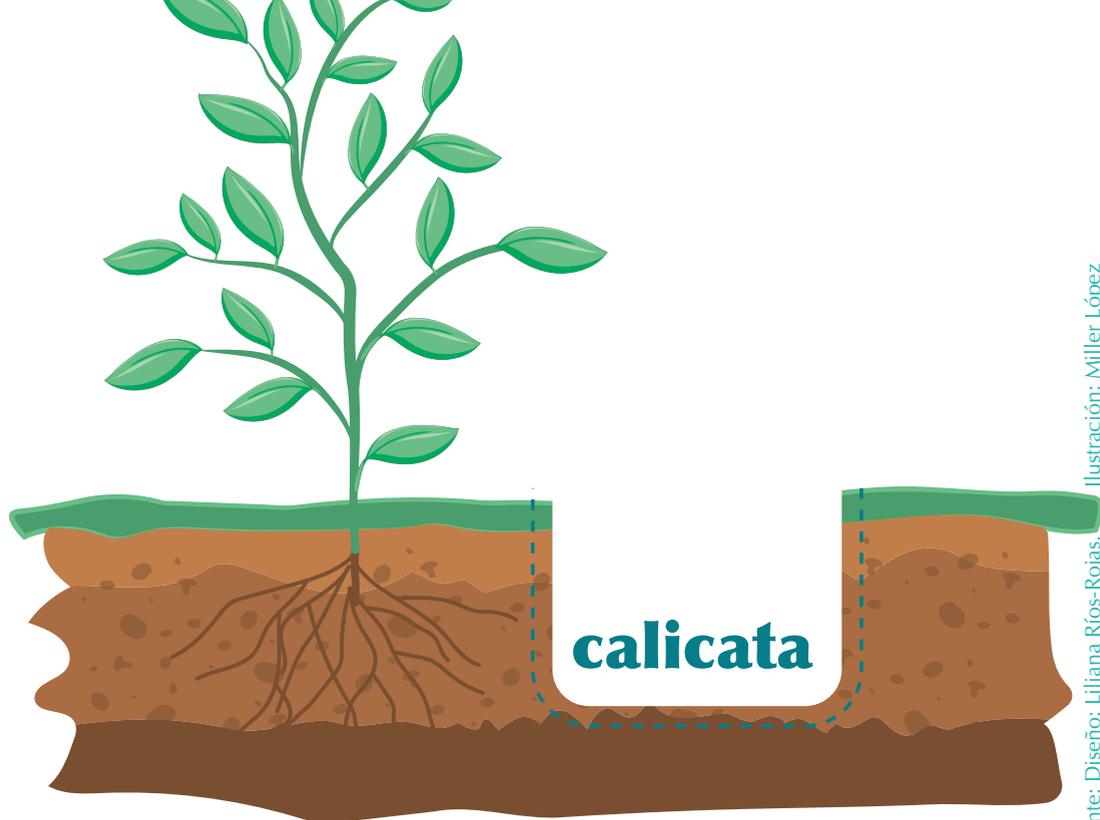


Ilustración: Miller López
Fuente: Diseño: Liliana Ríos-Rojas.

Figura 13. Esquema de ubicación de la calicata.

Ubicada la profundidad a la que se encuentran las raíces, se instala el sensor en la parte media de esta sección. En la figura 14 se muestra la ubicación del sensor en campo.



Foto: Liliana Ríos-Rojas

Figura 14. Sensor de humedad del suelo.

Si hay mayor disponibilidad de recursos, se puede instalar un segundo sensor, en la parte inferior de la sección de raíces, a fin de controlar los excesos (ver el esquema de la figura 11). Con la calicata también se pueden observar bloqueos a la profundización de las raíces, como niveles freáticos altos, capas arcillosas endurecidas o carbonatadas, capas arenosas, raíces enfermas, entre otros.



Área de raíces (A_r)

Conociendo ya hasta dónde debe profundizar el agua, es necesario identificar el área a “mojar”, es decir, el sitio donde se van a ubicar los emisores para aplicar el riego. El área para regar (A_r) se define de forma circular, es decir, se aplica la ecuación del círculo = $\pi * r^2$. En este caso, el radio (r) es la distancia desde el tronco hasta la periferia del plato (la gotera del árbol). En la figura 15 se esquematiza la forma de definir el radio: se trata de la línea blanca. Si este radio midiera 1 m, el área a regar sería 3,14 m².

Figura 15. Radio del árbol.

Volumen de riego (V_r)

Este volumen es el resultado de multiplicar la profundidad de raíces por el área a regar: V_r (m³) = P_r (m) * A_r (m²). Por ejemplo, si $P_r = 0,4$ m y $A_r = 3,14$ m², $V_r = 1,25$ m³.

Ahora bien, considerando una CC del 42 %, el volumen de agua a este nivel sería: $CC = 1,25$ m³ * 0,42 = 0,53 m³. Para llevar este suelo a CC, habría que agregar 530 l de agua. Considerando el

ejemplo planteado en el capítulo anterior, si este suelo es arcilloso y tiene un 26 % de humedad, y se requiere saber cuánto regar de forma óptima, se debe aplicar 7,6 % más de agua para que llegue a 80 % CC, es decir, 0,095 m³, o, lo que es igual, 95 l por planta.

El siguiente paso es identificar la forma más adecuada de aplicar este volumen de agua.



Foto: Liliana Ríos-Rojas

Capítulo V

¿Cómo regar?

La cuestión de cómo regar refiere a la forma de aplicación del agua para cumplir con el volumen previamente definido.

Sistemas de riego

Normalmente, los productores optan por los sistemas de riego con mayor disponibilidad en la localidad donde se encuentra el cultivo o por los más económicos para su bolsillo. Algunos, incluso, para el caso de los frutales, solo construyen sistemas de canales dentro del cultivo, cavan platos profundos y riegan ayudados por la gravedad. Este sistema es llamado precisamente riego por superficie o gravedad, y es el de mayor implementación en sistemas como la caña y algunos cereales, siendo el menos eficiente en cuanto a uso del agua. En segundo lugar de baja eficiencia estaría la aspersión, que se hace con cañones o aspersores de alto volumen. En este manual revisaremos aquellos que se recomiendan para el uso eficiente del agua.

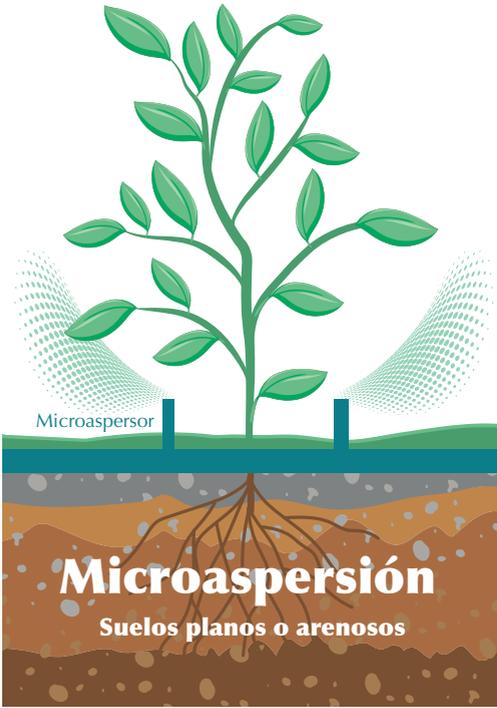
Goteo

Este sistema de riego es el más recomendado en términos de uso eficiente del agua. La aplicación es localizada y con bajos caudales. Si se ejecuta un programa de riego organizado y con la continuidad requerida, los tiempos de riego tienden a disminuir. Este riego es recomendado para cultivos de alta densidad, como las hortalizas o los árboles frutales. Es comúnmente usado y recomendado para suelos en pendiente, para texturas arcillosas o con problemas de infiltración y drenaje. En la figura 16 se relaciona un esquema del riego por goteo.



Fuente: Diseño: Liliana Ríos-Rojas. Ilustración: Miller López

Figura 16. Esquema de sistemas de riego por goteo.



Microaspersión

Es un sistema recomendado para cultivos frutales, en suelos arenosos y limosos, en pendientes planas. Es eficiente, pero un poco menos que el goteo, dado que usa un mayor volumen de agua, aunque aplicado correctamente en el tiempo logra altas eficiencias. En la figura 17 se relaciona un esquema del riego por microaspersión.

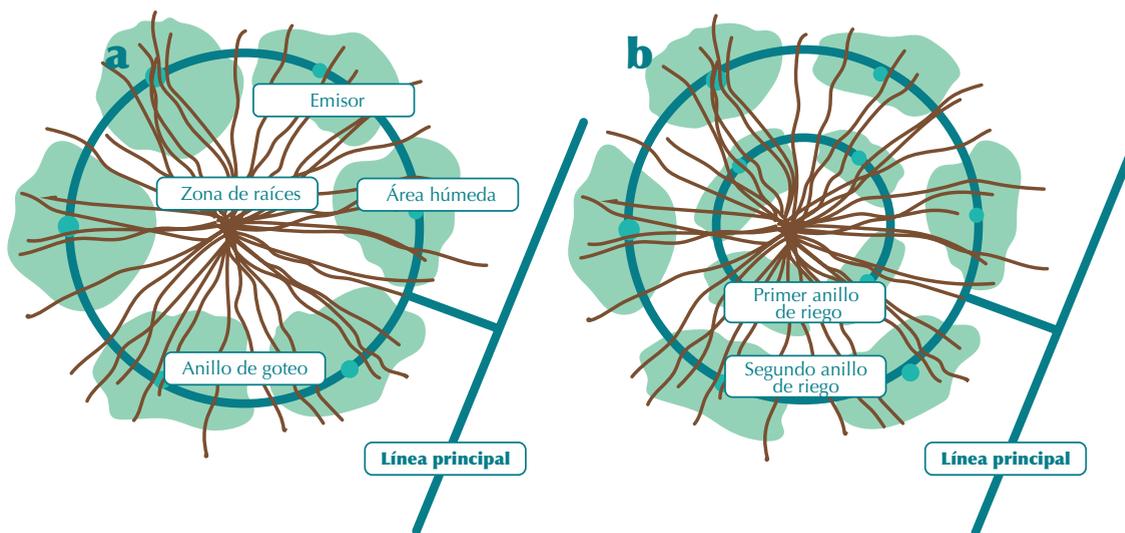
Figura 17. Esquema de sistemas de riego por microaspersión.

Ubicación del riego

Tal como se mostró en la figura 9, el riego se ubica en la distancia media del radio del plato. Sin embargo, obsérvese que el árbol allí presentado es joven y aún no está en producción, por eso se ubica un solo anillo de riego. Esto se esquematiza mejor en la figura 18a. Cuando este árbol crezca e inicie su fase productiva, se debe ampliar la sección de emisión de agua (figura 18b). Este hecho debe ser entendido desde el concepto de intercambio gaseoso. La pérdida de agua se da por los estomas, y dado que estos se encuentran

en las hojas, a medida que el árbol crece, aumenta su área foliar, por lo cual pierde más agua y, entonces, esta se debe reponer con mayor frecuencia.

Ahora bien, considérese una mayor reposición o frecuencia para árboles que, además de haber aumentado su área foliar, deben llenar frutos.



Fuente: Diseño: Liliana Ríos-Rojas. Ilustración: Miller López

Figura 18. Esquema de ampliación de la sección de riego. a. Árbol joven; b. Árbol en producción.

Número de emisores

Un emisor es un dispositivo con el que se aplica el agua en un determinado sitio: un gotero o un microaspersor. Para definir cuántos emisores deben ubicarse en un árbol, se hace una prueba sencilla en la zona de interés. Se inicia instalando la tubería y un anillo en cada árbol, sin insertar los emisores. Una vez puesto el anillo, se pone un emisor y se deja regar. Este emisor definirá un área

mojada en el tiempo. Se mide la sección de manguera dentro del área mojada. Así, esta longitud se puede dividir por la longitud total de la manguera, y el resultado será el número de emisores. Este ejercicio también se puede hacer con las áreas: la definida por el emisor y aquella alrededor de la manguera. En la figura 19 se relaciona un esquema con este ejercicio de medición.

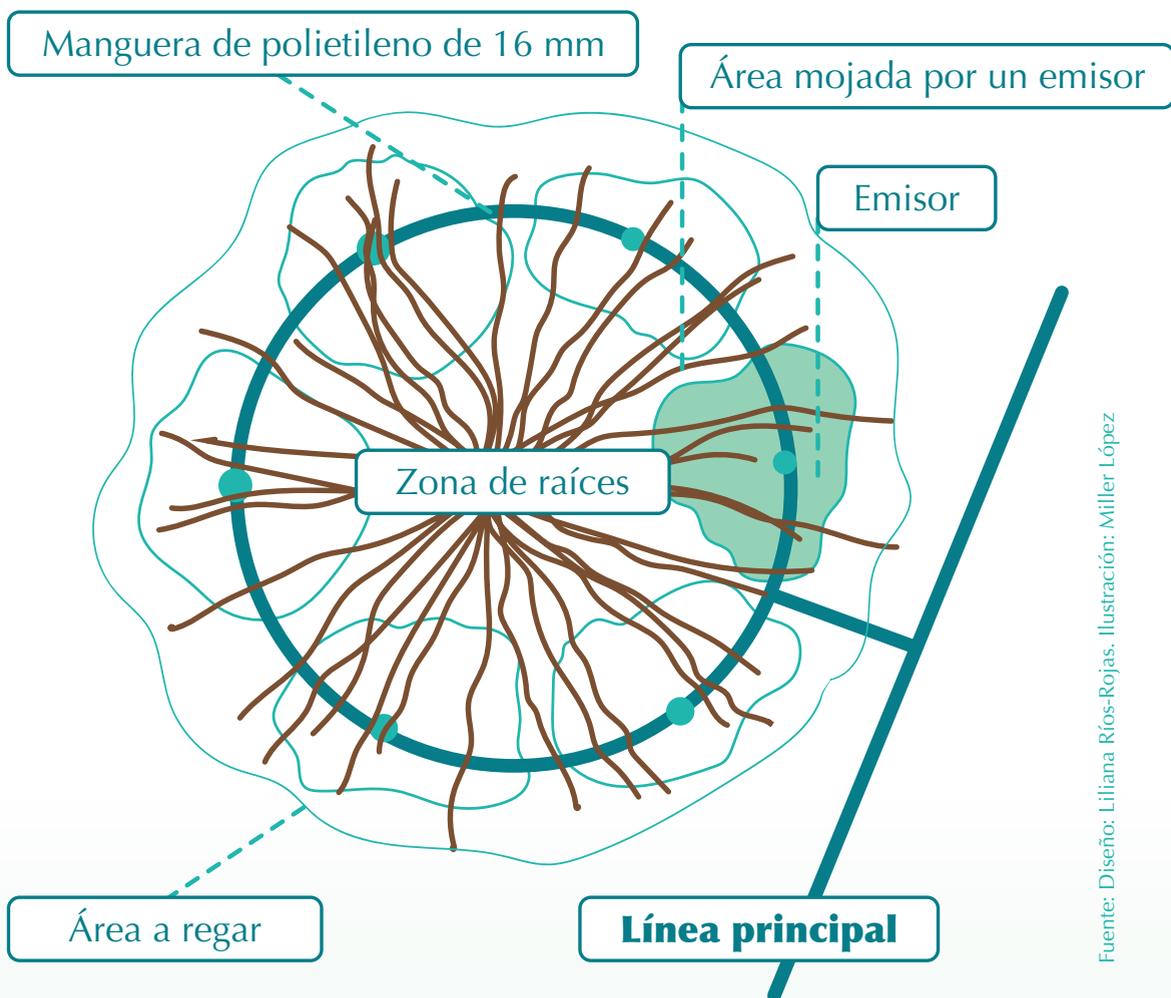


Figura 19. Determinación del número de emisores.

Para el caso de cultivos instalados en camas, algunos sistemas usan microaspersión de bajo caudal o goteros de más alto volumen. Para esto, se emplea una doble línea de manguera y allí se insta-

lan los microaspersores. Se recomienda continuar con la estrategia de determinación del área que moja cada emisor y cubrir toda el área de las raíces. En la figura 20 se ilustra la forma de instalación.

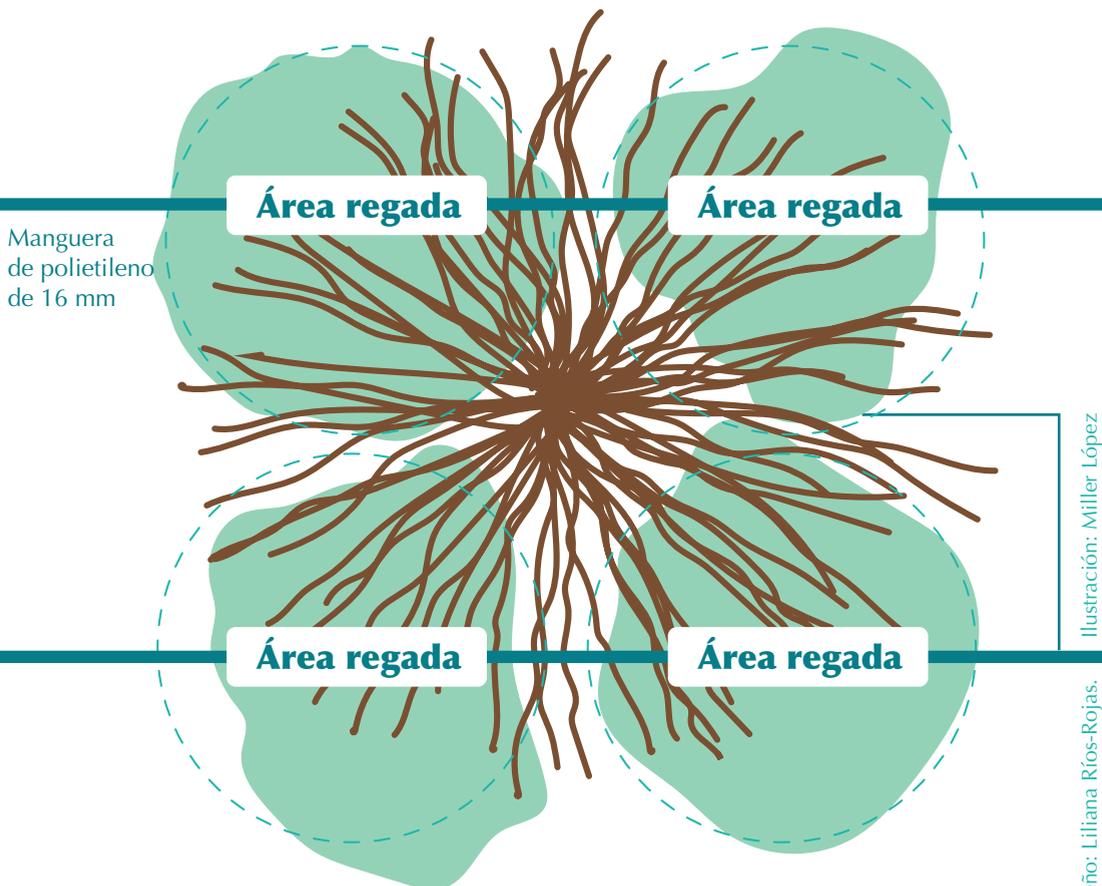


Figura 20. Esquema de instalación de los emisores en sistemas de doble línea.

Tiempo de riego

Definido el sistema con el que se va a regar, y determinado el número de emisores, se puede calcular el tiempo de riego. Si se tiene un sistema de riego con 7 emisores de $8 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$ cada uno, se tiene un total de $56 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$ en el anillo completo. Continuando con el ejemplo, si se deben aplicar 95 l, a razón de $56 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$, el tiempo de riego será de 1 h con 41 min.

Este tiempo de riego también puede determinarse con el sensor de humedad, lo cual se logra consultando continuamente el sensor, desde que se inicia el

riego hasta que se ha alcanzado la humedad definida como límite máximo, que, como vimos, para suelos arenosos y limosos es de 100 % CC y para suelos arcillosos es de 80 % CC.

Es importante anotar que la frecuencia de riego está definida por el consumo. Se vuelve a regar cuando el suelo pierda humedad y alcance valores cercanos a 64 % CC, es decir, cuando se haya perdido el 36 %. El periodo de riego es el tiempo que dura la aplicación del agua hasta que se consiga el límite máximo.



Foto: Lilliana Ríos-Rojas

Capítulo VI

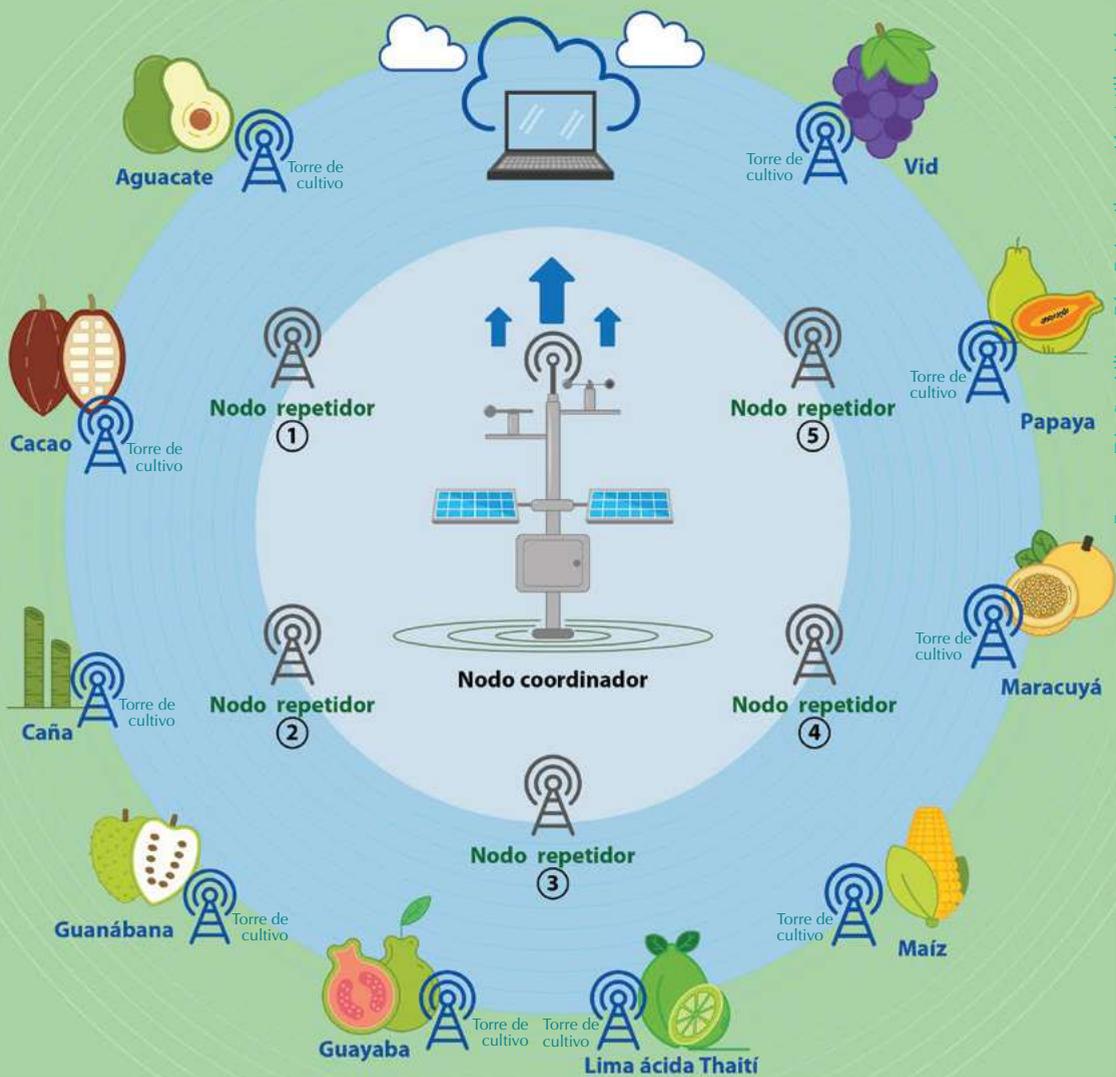
Integración del sistema en red IoT

Estructura del sistema IoT

La sigla IoT se refiere a la tecnología *internet of things*, que se traduce como ‘internet de las cosas’, que no es más que el uso de internet para transferir información/datos entre dispositivos y redes inalámbricas hasta un almacenador de gran magnitud —un servidor—, que en la jerga tecnológica se denomina nube. En este sitio, los datos están disponibles para los usuarios en tiempo real. En relación con el riego asociado a la agricultura 4.0, se usan redes IoT para transferir los datos capturados por sensores del clima, del suelo y de la planta.

Para el caso, se tiene una red instalada en el distrito de riego RUT que permite la transferencia de información desde las fincas hasta el usuario final: los productores y la

administración del distrito. Se seleccionaron diez fincas en el distrito, en función de la representatividad del cultivo para el sistema, se consideró que tuvieran un sistema de riego instalado, que efectivamente regaran y se hizo la caracterización de parámetros edáficos (con calicatas) y de manejo y uso del agua en la finca. Asimismo, se identificó el mejor sitio para hacer la instalación de la red IoT completa, según parámetros técnicos de alcance para la transferencia de información. En la figura 21 se muestra un esquema de la red instalada en el distrito RUT, la cual permite obtener información en tiempo real de diez cultivos: aguacate, cacao, caña, guanábana, guayaba, lima ácida tahití, maíz, maracuyá, papaya y vid.



Fuente: Diseño: Liliana Ríos-Rojas. Ilustración: Miller López

Figura 21. Esquema de la red IoT del distrito de riego RUT.

Cada punto de la red cuenta con dos sensores de humedad, tipo capacitancia, que monitorean el cambio de la humedad del suelo con una resolución temporal de 20 min. La información captada por los sensores se transfiere al almacenador de datos y de este, por medio de

una antena wifi, a otra antena, denominada repetidor, que a su vez transfiere al nodo principal o coordinador. Este nodo está ubicado en el centro administrativo del distrito de riego RUT. En la figura 22 se presentan detalles de las estaciones de red en el sitio del cultivo.



Fotos: Liliana Ríos-Rojas

Figura 22. Detalles de la red del distrito de riego RUT. a. Maíz; b. Papaya; c. Vid; d. Cítricos; e. Guayaba

Los sensores de humedad del suelo, ubicados en la profundidad media de las raíces de cada cultivo (tabla 1), registran el estado hídrico del suelo cada 20 min.

Tabla 1. Profundidad de las raíces en cultivos experimentales

Cultivo	Profundidad raíces (cm)	Profundidad del sensor (cm)
Aguacate	50 - 60	30
Cacao	40 - 50	25
Caña	20 -30	15
Guanábana	50 - 60	30
Guayaba	50 - 60	30
Lima ácida Tahití	50 -60	30
Maíz	20 - 30	15
Maracuyá	20 - 30	20
Papaya	20 - 30	20
Vid	40 - 50	25

Fuente: Elaboración propia

Tipo de información que entrega la red

El dato entregado está en relación volumen/volumen (%), es decir que no se requiere ninguna transformación o dato de densidad aparente. Con lo anterior, la información puede ser interpretada directamente: hay exceso si el sensor registra humedad sobre 80 % CC (caso suelos arcillosos) y déficit si registra alrededor de 64 % CC. En la figura 23 se relaciona una

sección de la serie entregada por los sensores del cultivo de papaya. Allí se muestra la CC, esto es, el 80 % CC, límite de humedad que debe contener el suelo después de un evento de riego, y 64 % CC, momento en el que se debe volver a regar. Las secciones sombreadas en verde muestran los periodos en los que el cultivo presentó exceso hídrico y la banda azul, el periodo de extremo déficit, los cuales fueron registrados por los sensores de humedad y reportados a la nube.

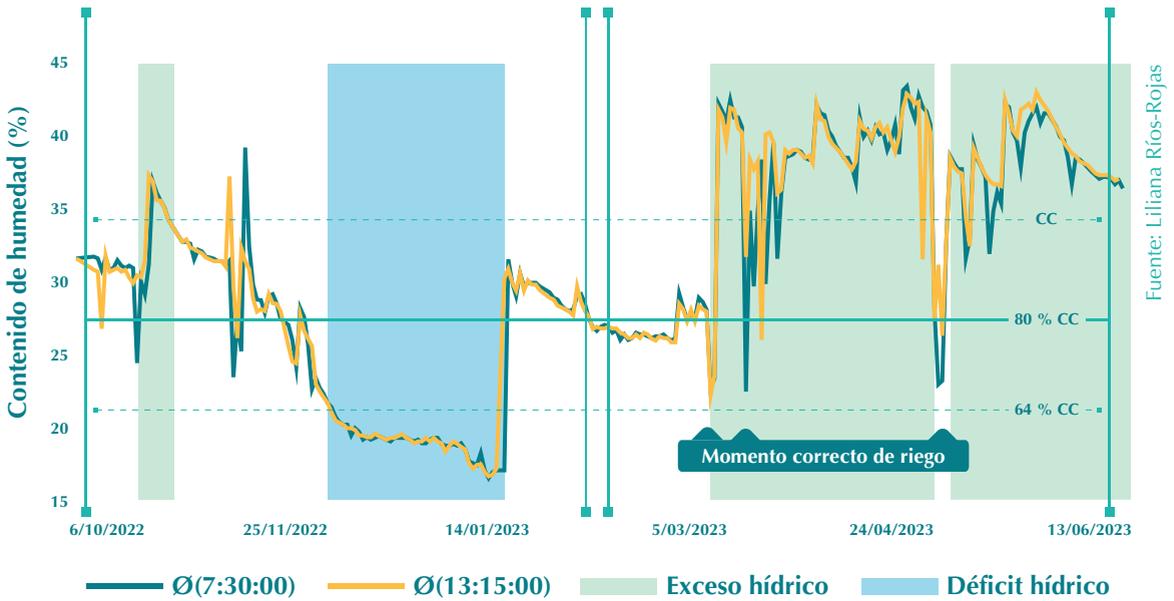


Figura 23. Fracción de una serie de sensor de humedad del suelo.

Ahora bien, esta serie corresponde a un cultivo de papaya, el cual requiere la construcción de camas altas para mantener un adecuado nivel de drenaje; a pesar de ello, se presentaron largos periodos de exceso hídrico, derivado de las entradas de agua en el sitio de las raíces, debido a la lluvia o a los continuos riegos. Si se trata de riego, entonces se entiende que es un error en el cálculo de las frecuencias. Obsérvese que, a pesar de tener eventos correctos de riego, es decir que se regó en el momento oportuno, cuando la humedad se encontraba alrededor de 64 % CC, los periodos de riego fueron muy prolongados y la humedad permisible del suelo (80 % CC) fue excedida, incluso superando la CC.

Consulta de la información de la plataforma-nube

Para verificar si se debe regar o no, se hacen dos consultas al día de los datos guardados en el servidor. Esta información se compara con los criterios de riego —80 % CC y 64 % CC—. En la tabla 2 se relaciona una fracción de la serie de un cultivo en el momento que requería riego. Para el caso de la tabla 2, tomada de la base de datos de un cultivo de guayaba, se tiene la CC, que, como se indicó anteriormente, es un dato entregado por un laboratorio o por un especialista en la determinación del parámetro en campo. Con este dato de CC, se calcula el límite máximo de riego, 80 % CC, referido a la máxima humedad que vamos a permitir en el suelo después de un evento de riego.

Especie		Guayaba	
CC (%)		36	
Límite máx. riego 0,8 CC		28,8	
Decisión máx. riego (0,64 CC)		23,04	
Fecha	Ø (7:30:00)	Ø (7:30:00)	Recomendación de riego
5/05/2023	31	29	No regar
6/05/2023	28	27	No regar
7/05/2023	27	26	No regar
8/05/2023	26	25	No regar
9/05/2023	26	25	No regar
10/05/2023	25	24	No regar
11/05/2023	24	23	Regar
12/05/2023	27	26	No regar

Tabla 2. Uso de la información de humedad del suelo para decidir riego*

*Hoja de cálculo propuesta por Liliana Ríos-Rojas

Fuente: Elaboración propia

También se calcula el límite mínimo al que se deja secar el suelo y desde el cual se toma la decisión de regar, que es 64 % CC. Para el caso del cultivo de guayaba, es 23,04 %, es decir que se riega cuando el sensor indique que el contenido de humedad del suelo está en un valor muy cercano a 23 %, y se suspende el riego cuando la humedad llegue a 28,8 %. Obsérvese que la consulta de la humedad del suelo en la plataforma (Greeniti 3.0 - <https://appagricultor.com/login/?next=/>) se hace dos veces al día. Para el caso (tabla 2), la humedad en la mañana estaba en 24 %, pero en la tarde el consumo de la atmósfera y la planta llevó el suelo a un valor cercano a 64 % CC, esto es, 23 %: en este momento se debe regar.

Para ingresar y consultar la información, Visualiti SAS, AGROSAVIA y Asorut han desarrollado un tutorial que puede consultar en la dirección web <https://www.youtube.com/watch?v=XO7yQrT3a-w>



Use la *Plantilla para riego* de Excel y decida si regar o no, ingresando los datos de humedad consultados desde la plataforma. Descárguela en el siguiente enlace: <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual.7407112>

Beneficios sociales y económicos del uso de tecnologías agricultura 4.0 e IoT

Sotomayor et al. (2022) reportan la necesidad de digitalizar el pequeño y mediano agronegocio, para promover la agricultura de precisión, incrementar la productividad y aprovechar eficientemente los recursos. Esta digitalización se refiere al uso de dispositivos que, interconectados por una red vía internet, permiten almacenar grandes volúmenes de información, disponible para gran cantidad de usuarios y en tiempo real, y destinada a la toma de decisiones oportunas. De acuerdo con Olakunle et al. (2018), dentro de los beneficios de las tecnologías 4.0 está su potencialidad para promover la agricultura comunitaria, aprovechar el IoT para el almacenamiento de información e incentivar la interacción entre los agricultores y los expertos en agricultura.

Por otra parte, el agua para los cultivos debe estar disponible en los periodos específicos en que es requerida (Chiarelli et al., 2020). Los periodos prolongados de sequía, sin riego complementario, generan estrés hídrico en los cultivos, y ocasionan baja productividad y pérdidas económicas para los productores (Fonade, Ideam, BID, 2013). El riego se debe aplicar antes o en el momento de agotarse la lámina de agua fácilmente extraíble del suelo (Allen et al., 2006). Para lograr esta precisión en el riego, la tecnificación es el camino, pues la implementación de nuevas tecnologías permite una adecuada gestión hídrica y una optimización de los recursos, los combustibles y la mano de obra, pero, sobre todo, genera mejores rendimientos por unidad de agua consumida, lo cual incrementa la productividad de agua y asegura un uso más sostenible de los recursos (FAO, 2013).



Foto: Lilliana Ríos-Rojas



Foto: Alejandro Jaramillo



Foto: Liliana Ríos-Rojas

Capítulo VII

Recomendación tecnológica para los regantes

En la figura 24 se presenta un diagrama-resumen para los regantes, con el cual es posible hacer una lista de chequeo para ejecutar el riego con la tecnología propuesta. Asimismo, a continuación, se presenta un detalle explicativo tipo glosario con conceptos y procedimientos vinculados al esquema.

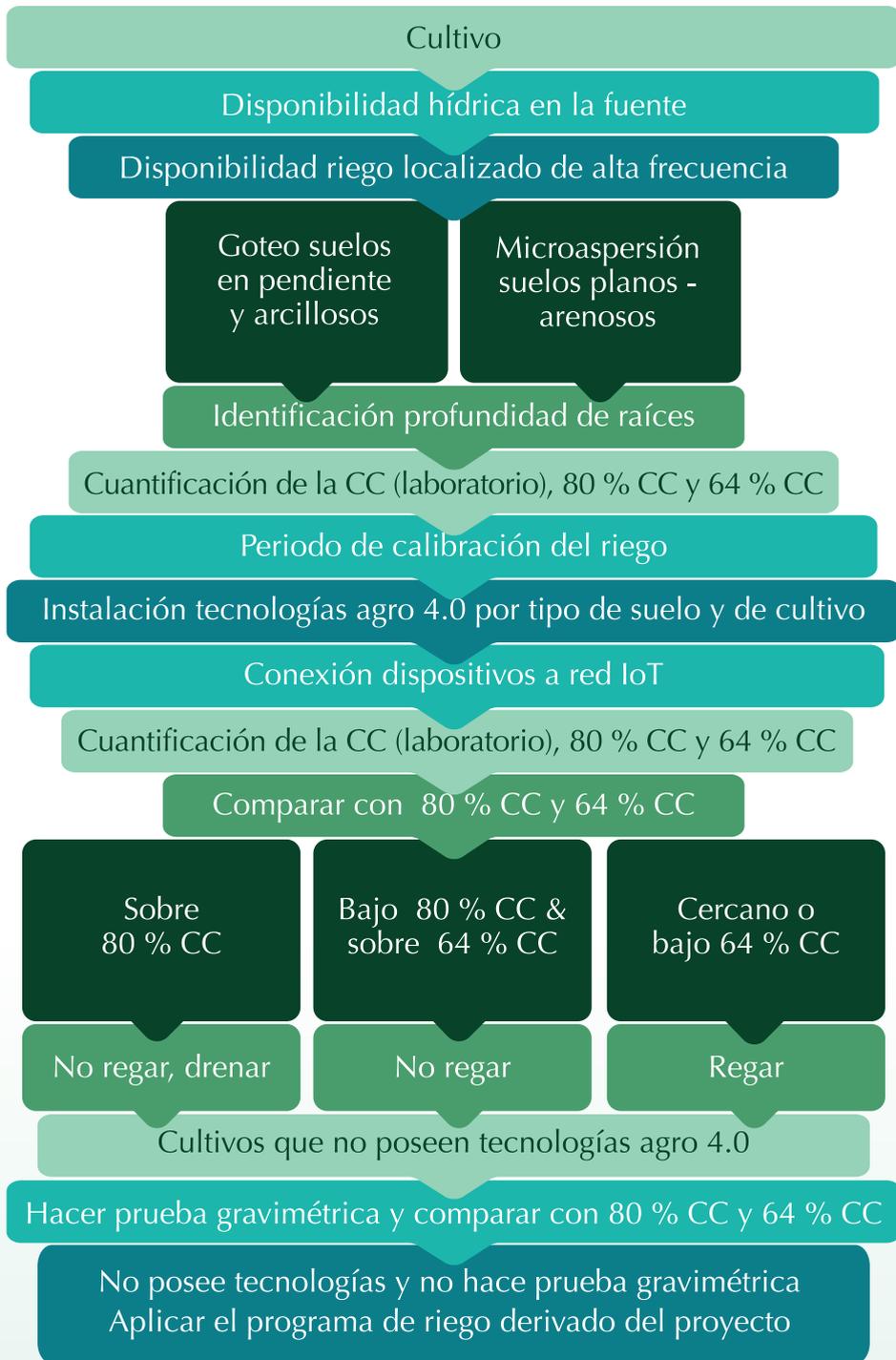


Figura 24. Esquema de la recomendación tecnológica para los regantes.

Fuente: Diseño: Liliana Ríos-Rojas. Ilustración: Miller López

Cultivo

Es necesario conocer el cultivo para identificar el sistema de riego a usar, considerando la profundidad y distribución de las raíces y la disponibilidad de agua en el suelo. En el caso del distrito de riego RUT, donde los lotes ya están establecidos, la recomendación aplica para aquellos cultivos que vayan a ser reemplazos (caso papaya y maracuyá, que son rotativos) o para ampliación de nuevas áreas. Asimismo, es recomendable considerar no establecer cultivos susceptibles a excesos de humedad, dado que en el distrito el nivel freático es alto. Es necesario realizar una adecuada preparación del suelo y, preferiblemente, realizar siembras en camas.

Disponibilidad hídrica en la fuente

En este aspecto, es necesario que el productor se pregunte si la fuente hídrica disponible es suficiente para la demanda de la finca en época seca y si esta le permite la ampliación de nuevas áreas.

Disponibilidad de riego localizado de alta frecuencia

Al respecto, es necesario que el productor se pregunte si tiene los recursos necesarios para hacer una correcta instalación del sistema de riego. Una instalación ligera, no adecuada, del sistema de riego genera problemas en el mediano plazo. Tener un sistema que no cumpla con los requerimientos del cultivo





afecta la eficiencia en el uso del agua y la expresión del potencial productivo del cultivo. Se recomienda la instalación de riego localizado de alta frecuencia y no implementar el riego por gravedad o por superficie, debido a que estos no permiten un uso eficiente del agua y de la energía. El riego por goteo es recomendado para suelos con altos contenidos de arcilla, ya sea que se encuentren ubicados en condición plana o en pendiente. Riegos de mayor caudal aumentan la escorrentía en este tipo de suelos. El riego por microaspersión se recomienda para suelos planos de características arenosas. Un suelo arenoso con goteo genera bulbos de humedecimiento reducidos, más aún si no se tiene una correcta distribución de los emisores.

Identificación de la profundidad de las raíces

Este factor, uno de los más importantes y que resulta clave para identificar en qué sitio específico se deben instalar los sensores de humedad del suelo, es entendido como la zona media de mayor abundancia de raíces. Además, esta identificación permitirá observar elementos que afectan la profundización de la raíz o que le generan limitantes.

Cuantificación de la CC

Este factor se determina en el laboratorio, con una muestra de suelo tomada con anillos, por medio de una prueba que se denomina curva de retención de humedad (CRH). También puede ser



Foto: Héctor Hernández

determinada en campo o desde una serie de humedad del suelo por un profesional experto en el área. Una vez se conozca la CC, se calcula el límite máximo de humedad a mantener, que para suelos arcillosos y francos será de 80 % CC, y para suelos con características arenosas, de 100 % CC. Para volver a regar, se debe dejar que la humedad esté cercana o igual a 64 % CC.

Periodo de calibración del riego

En este periodo se debe observar (visualización en la zona del plato) que toda el área de las raíces haya sido cubierta por la humedad, que el agua efectivamente infiltra (visualización en profundidad de raíces) y que no se genera escorrentía continua de gran caudal (escurrimiento fuera del área del plato). En caso de que esto no se cum-



pla, se debe instalar un mayor número de emisores en el área con menor caudal nominal. También se debe verificar que no existan fugas en el sistema y que los emisores entregan ± 90 % del caudal nominal.

Instalación de tecnologías de agricultura 4.0 por tipo de suelo y de cultivo

Estas tecnologías se refieren al uso de sensores de humedad del suelo, de la planta

y de la atmósfera. Para calcular el balance de agua en el suelo, se deben consultar los sensores de humedad ubicados a la profundidad de las raíces. Estos sensores registran en unidades de porcentaje (%) e indican cuándo y cuánto regar. Cuando registren datos no coherentes dentro de los rangos establecidos para la CC, se debe consultar al técnico. En necesario instalar tantos sensores como diferencias de suelo y de cultivo se tengan en la finca. Asimismo, se debe conocer la varia-



Foto: Héctor Hernández

bilidad espacial biofísica de la finca para hacer una correcta instalación del sistema de monitoreo.

Conexión de dispositivos a red IoT

Previamente a la instalación de los dispositivos de monitoreo, se debe contar con acceso a in-

ternet y con los dispositivos que permiten la conexión a la red IoT de cada equipo de monitoreo. Cabe recordar que esta red requiere antenas wifi en el sitio de los sensores y un nodo central que transfiere la información a la nube. Si este nodo está muy alejado del sitio de monitoreo, se

requerirá conexión con nodos repetidores, que son antenas transmisoras entre la finca y el sitio del nodo principal. La dimensión de la red está en función del número de cultivos vinculados a ella y de las distancias. Esto debe ser diseñado y consultado con un experto en redes IoT.

Consulta mañana y tarde del estado de humedad del suelo

Con la información en la nube es posible hacer la consulta directa desde un dispositivo que tenga acceso a internet: celular, tableta, computador, etcétera. Se ingresa a la red del sitio web (tutorial en <https://www.youtube.com/watch?v=XO7yQrT3a-w>) que tiene el servidor con el que se contrató el almacenamiento de información. Luego, se ingresan el usuario y la contraseña, y se accede a la base de datos. Allí, previamente identificados con nombres conocidos, se ingresa a cada sensor de la red. En cada uno de ellos se consulta

el estado de humedad del suelo, si esta fuese la variable de interés. La consulta se debe hacer en la mañana (antes de las 7:00 h) y en la tarde (no después de las 15:00 h), a fin de regar con mayor precisión. El valor de la humedad consultado es comparado con 80 % CC y 64 % CC. Si la humedad se encuentra sobre 80 % CC, no se debe regar, siempre y cuando se trate de suelos arcillosos y francos; en suelos arenosos, sí se debe regar hasta alcanzar 100 % CC. Si la humedad se mantiene sobre 80 % CC o sobre 100 % CC, se deben procurar obras de drenaje. Si la humedad se encuentra bajo 80 % CC y sobre 64 % CC, no se debe regar: en este estado el suelo tiene





Foto: Liliana Ríos-Rojas

la humedad suficiente para que las plantas cumplan sus funciones fisiológicas. Recuérdese, para suelos arcillosos y francos, si la humedad está muy cercana o bajo 64 % CC, se debe regar inmediatamente, y solo si esta humedad fue consultada antes de las 15:00 h. Regar en horas de poca luz o en la noche no es recomendable, ya que los estomas están cerrados y no hay acceso de CO_2 , y en cambio, el agua se estará evaporando desde la superficie del suelo. En este caso, habrá pérdida, sin ningún tipo de aprovechamiento.

El uso de la aplicación de riego en formato Excel, para aquellos productores que poseen la tecnología, depende de consultar previamente en la red el dato del contenido de humedad en el suelo, en tiempo real. El productor debe ingresar a la plataforma vía



internet, digitar su usuario y contraseña, y consultar el valor de la humedad (tutorial: <https://www.youtube.com/watch?v=XO7yQrT3a-w>). En una próxima versión de este manual, dicho valor podrá ser consultado directamente en un dispositivo móvil, que, además, emitirá alertas (notifica-

ciones) sobre el estado de humedad del suelo y sobre el momento de riego.

Cultivos que no poseen sistema de tecnologías en agricultura 4.0

Si el productor no posee un sistema de monito-

reo en agricultura 4.0, puede hacer uso de las tecnologías no digitales. A continuación, se hacen algunas recomendaciones cuando no se cuenta con este tipo de tecnologías.

Hacer prueba gravimétrica y comparar con 80 % CC



Foto: Lilliana Ríos-Rojas

y 64 % CC: la prueba gravimétrica entrega el valor de humedad que poseía el suelo en el momento de la extracción de la muestra. Es necesario que la muestra se pese en campo o se traslade lo más rápido posible, muy bien almacenada, hasta el sitio de pesado. En este caso, se debe seguir el protocolo descrito en la página 32 de este manual. Una vez calculado el contenido de humedad del suelo,

comparar con 80 % CC y 64 % CC, y decidir si regar o no.

Si no se cuenta con tecnologías y no es posible realizar una prueba gravimétrica, se sugiere aplicar la recomendación de riego propuesta en la tabla 3. Aplica para aquellos productores que hacen riego según un calendario, sin criterio para esta actividad.

Tabla 3. Programa de riego para las especies priorizadas en el distrito de riego RUT

Especie	CC	m*	0,8 CC[!]	0,64 CC^{**}	Frecuencia[†] (días)	Periodo[□]
Aguacate	38	0,864	30,4	24,32	11	1,5 horas
Cacao	34	0,7992	27,2	21,76	11	40 min
Caña	44	0,4968	35,2	28,16	18	1 hora
Guanábana	40	0,8712	32	25,6	15	1 hora
Guayaba	36	2	28,8	23,04	10	40 min
Lima ácida Tahití	36	0,7488	28,8	23,04	10	1 hora
Maíz	50	0,8136	40	32	15	40 min
Maracuyá	28	0,6552	22,4	17,92	7	20 min
Papaya	36	1,5408	28,8	23,04	10	40 min
Vid	42	1,5768	33,6	26,88	15	1,5768
Tahití-Palmira	22	0,4104	17,6	14,08	9	1 hora

* Pendiente matemática de la serie de secado.

! 0,8 CC = 80 % de la capacidad de campo. Límite superior de riego.

** 0,64 CC = 64 % de la capacidad de campo. Límite inferior de contenido de agua en el suelo, momento de volver a regar.

† Frecuencia de riego. Tiempo que transcurre entre un riego y el otro.

□ Periodo de riego. Tiempo que debe durar el riego.

Fuente: Elaboración propia



Foto: Alejandro Jaramillo

Referencias

- Aguilera, J. (2020). *El agua en el cosmos: la matriz de la vida*. RBA.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Irrigation and drainage paper n.º 56: crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements)*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). <https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).
- Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia [CTA]. (2018). *Informe de priorización de los elementos críticos para mejorar la productividad del agua y la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales y el reúso del agua*. Departamento Nacional de Planeación [DNP]. https://www.dnp.gov.co/LaEntidad_/misiones/mision-crecimiento-verde/Documents/ejes-tematicos/Agua/INFORME_PRIORIZACION_12_02_18.pdf
- Chen, Y. (2021). *Cell wall-related and biomechanics mechanisms in stomatal function and development* [Tesis de doctorado, Pennsylvania State University]. <https://etda.libraries.psu.edu/catalog/20976yuc53>
- Chiarelli, D., Passera, C., Rosa, L., Davis, K., D'Odorico, P., & Rulli, M. (2020). The green and blue crop water requirement WATNEEDS MODEL AND ITS GLOBAL GRIDDED OUTPUTS. *Scientific Data*, 7(1), 1-9. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32811838/>
- Fernández, M. (2013). *Efectos del cambio climático en el rendimiento de tres cultivos mediante el uso del modelo AquaCrop: evaluación del riesgo agroclimático por sectores*. Fondo Financiero de Proyectos de Desarrollo (Fonade); Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam); Banco Interamericano de Desarrollo (BID). http://sgi.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Informe+Final_+Efectos+del+CC+en+el+rendimiento+de+cultivos+agr%C3%ADcolas.pdf/77713ccef6-4eb9-9ad6-02985c72b76b
- Guardiola, J., & García, A. (1990). *Fisiología vegetal I: nutrición y transporte*. Síntesis.
- Henry, C., John, G., Pan, R., Bartlett, M., Fletcher, L., Scoffoni, C., & Sack, L. (2019). A stomatal safety-efficiency trade-off constrains responses to leaf dehydration. *Nature Communications*, 10, 3398. doi.org/10.1038/s41467-019-11006-1
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018*. Ideam. <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/125678471/Estudio+Nacional+del+Agua+2018.pdf/bb4f1383-50e1-4f7d-bdc7-356b6b66b4f0?version=1.0>
- Luo, Y., & Zhou, X. (2006). *Processes of CO₂ production in soil: soil respiration and the environment*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-088782-8.X5000-1>
- Margulis, L., & Sagan, D. (2012). El proceso de nutrición en las plantas. En *Biología y geología* (pp. 241-258). McGraw-Hill. <https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448180895.pdf>



- Melgarejo, L. (2010). *Experimentos en fisiología vegetal*. Universidad Nacional de Colombia.
- Olakunle, E., Igbafe, O., & Tharek, A. (2018). An overview of internet of things (IoT) and data analytics in agriculture: benefits and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(5), 3758-3773. <https://connections-qj.org/article/overview-internet-things-iot-and-data-analytics-agriculture-benefits-and-challenges>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO]. (2009). *Guía para la descripción de suelos*. FAO. <https://www.fao.org/3/a0541s/a0541s.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO]. (2013). *Tecnologías para el uso sostenible del agua: una contribución a la seguridad alimentaria y la adaptación al cambio climático*. Global Water Partnership. <https://www.fao.org/3/i3442s/i3442s.pdf>
- Sotomayor, O., Ramírez, E., & Martínez, H. (2022). *Digitalización y cambio tecnológico en las mipymes agrícolas y agroindustriales en América Latina*. CEPAL; Euromipyme; FAO; ELAC. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/46965/4/S2100283_es.pdf
- Tejada, A. (2018). *La humedad en la atmósfera: bases físicas, instrumentos y aplicaciones*. Universidad de Colima.
- Tovar, S., Solórzano, J., Badillo, A., & Rodríguez, G. (2019). Internet de las cosas aplicado a la agricultura: estado actual. *Lámpsakos*, 22, 86-105. <https://doi.org/10.21501/21454086.3253>
- Water Science School (2008). *Water, the universal solvent*. United States Geological Survey [USGS]. <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/water-universal-solvent#:~:text=Water%20is%20called%20the%20%22universal,chemicals%2C%20minerals%2C%20and%20nutrients>
- Urry, L., Cain, M., Wasserman, S., Minorsky, P., & Orr, R. (2021). *Campbell biology in focus* (3a ed.). Pearson.
- Visualiti SAS, AGROSAVIA & Asorut. (2024, 23 de febrero). *Instructivo para ingresar a la plataforma Appagricultor.com* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=XO7yQrT3a-w>
- Zambon, I., Cecchini, M., Egidi, G., Saporito, M.G., & Colantoni, A. (2019). Revolution 4.0: industry vs. agriculture in a future development for SMEs. *Processes*, 7(1), 36. <https://doi.org/10.3390/pr7010036>
- Zhao, W., Liu, L., Shen, Q., Yang, J., Han, X., Tian, F., & Wu, J. (2020). Effects of water stress on photosynthesis, yield, and water use efficiency in winter wheat. *Water*, 12(8), 2127. <https://doi.org/10.3390/w12082127>
- Zotarelli, L., Dukes, M., & Morgan, K. (2019). *Interpretación del contenido de la humedad del suelo para determinar capacidad de campo y evitar riego excesivo en suelos arenosos utilizando sensores de humedad*. Universidad de la Florida. <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/AE496>

Los autores

Liliana Ríos-Rojas

lriosr@agrosavia.co

<https://orcid.org/0000-0002-6978-0434>

Ingeniera agrícola, magíster en Ingeniería de Recursos hidráulicos, doctora en Ciencias de la Agricultura, mención en Fisiología Vegetal con énfasis en Relaciones Hídricas de los Cultivos. Desde junio de 2008 se encuentra vinculada a AGROSAVIA, donde ha enfocado su trabajo de investigación en los métodos de cuantificación precisa de la oferta de agua en el suelo y la demanda atmosférica, para cubrir las necesidades hídricas de las plantas: sin excesos y sin déficit. Aplica tecnologías de agricultura 4.0 acopladas a herramientas IoT para monitorear el sistema completo suelo-planta-atmósfera y así tomar decisiones en tiempo real que aporten a lograr un uso eficiente del recurso agua en la agricultura.

Marysol Cano Benítez

mcanob@agrosavia.co

<https://orcid.org/0000-0003-4335-0310>

Ingeniera agrícola, magíster en Ciencias Agrarias, mención en Fisiología Vegetal. Vinculada a AGROSAVIA desde febrero de 2015 hasta la fecha. El enfoque de su trabajo ha sido el apoyo a la investigación en temas como uso eficiente del agua; necesidades hídricas de la planta; variables ambientales; aplicación de tecnologías de agricultura 4.0; manejo y supervisión de equipos portátiles para monitoreo del sistema suelo-agua-planta-atmósfera en parcelas experimentales, y toma y procesamiento de datos de campo.



Leonardo Castillo Sánchez

sanchez709@hotmail.com

<https://orcid.org/0009-0008-6083-5639>

Ingeniero agrícola, magíster en Ciencias Agrarias y especialista en Gestión de Proyectos. Vinculado al distrito de adecuación de tierras RUT desde junio de 2011. Su trabajo se enfoca en la adecuación de tierras, el manejo de los recursos hídricos, la gestión de proyectos agropecuarios y la gerencia de la asociación de usuarios Asorut, aliado histórico de AGROSAVIA en procesos de investigación.

Mauricio Fernando Martínez

mmartinez@agrosavia.co

<https://orcid.org/0000-0002-8145-1764>

Ingeniero agrónomo, MSc en Biotecnología Vegetal, candidato a PhD en Fitomejoramiento. Es investigador máster sénior en AGROSAVIA. Participa en investigación y producción de especies frutícolas como cítricos, aguacate, pitaya y piña. Orienta su trabajo al aseguramiento de calidad genética, fisiológica y fitosanitaria de material de propagación en frutales, principalmente en aguacate y cítricos. Además, articula las áreas de biología molecular en caracterización de recursos fitogenéticos y estandarización de técnicas de diagnóstico con la producción de material vegetal en condiciones protegidas y conservación de semillas. Participa en los programas de mejoramiento genético de aguacate y cítricos, evaluando copas y portainjertos para aumentar la oferta varietal en Colombia. Ha participado en actividades de docencia en el área de reproducción y multiplicación vegetal en frutales.



Foto: Claudia Narváez

Esta publicación busca aportar en el cambio de paradigma para optimizar el manejo del agua en la pequeña escala, aplicando herramientas para la gestión integral de los recursos productivos e incursionar en la agricultura digital. Se detallan los métodos aplicados de un piloto en el distrito de riego Roldanillo, La Unión y Toro (RUT), en el departamento del Valle del Cauca, que en la práctica son base para cualquier manejo hídrico en sistemas productivos agrícolas. El uso de la agricultura 4.0 acoplada al internet de las cosas (IoT) promueve la agricultura comunitaria y permite la interacción entre los agricultores y los expertos en agricultura. Este manual ofrece recomendaciones técnicas de riego a los productores en general y pone de manifiesto que, con la medición de las condiciones hídricas en el sitio específico y de manera continuada, es posible tomar decisiones productivas en tiempo real. Se muestra, paso a paso, cuándo (frecuencia), cuánto (periodo) y cómo (sistema) regar, usando herramientas de agricultura 4.0, y, además, se exponen técnicas alternativas para quienes no tienen acceso a herramientas digitales.

AGROSAVIA

Corporación colombiana de investigación agropecuaria



978-958-740-710-5

Distribución gratuita
Prohibida su venta

