


Requerimientos hídricos del cultivo de aguacate (*Persea americana*) variedad Hass en zonas productoras de Colombia

Diana Dorado Guerra
Luis Carlos Grajales Guzmán
Alexander Rebolledo Roa



**Requerimientos hídricos del cultivo
de aguacate (*Persea americana*)
variedad Hass en zonas productoras
de Colombia**

**Diana Dorado Guerra
Luis Carlos Grajales Guzmán
Alexander Rebolledo Roa**

Mosquera, Colombia, 2017

Dorado Guerra, Diana

Requerimientos hídricos del cultivo de aguacate (*Persea americana*) variedad Hass en zonas productoras de Colombia. / Diana Dorado Guerra, Luis Carlos Grajales Guzmán y Alexander Rebolledo Roa. -- Mosquera (Colombia) : Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), 2017.

90 páginas

Incluye referencias bibliográficas, datos numéricos e ilustraciones

ISBN obra impresa: 978-958-740-231-5 ISBN (e): 978-958-740-232-2

1. *Persea americana* 2. Rendimiento de cultivos 3. Recursos hídricos 4. Balance hídrico 5. Tolima (Colombia) 6. Antioquia (Colombia) 7. Cauca (Colombia) I. Grajales Guzmán, Luis Carlos II. Rebolledo Roa, Alexander

Palabras clave normalizadas según Tesauro Multilingüe de Agricultura Agrovoc
Catalogación en la publicación – Biblioteca Agropecuaria de Colombia

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria
Corpoica
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 es resultado del proyecto “Aproximación al
requerimiento hídrico y rompimiento de estacionalidad en el
cultivo de aguacate (*Persea americana*) variedad Hass, en las zonas
productoras de Colombia”, enmarcado en el programa *Manejo
integrado del cultivo de aguacate* (*Persea americana*) var. *Hass para
incrementar la calidad y el rendimiento en zonas productoras de
Colombia*, Convenio 1790, financiado por Colciencias mediante
el contrato RC 0196-2012.

Primera edición: 2.000 ejemplares
Impreso en Bogotá, Colombia
Printed in Bogota, Colombia

Preparación editorial
Editorial Corpoica
editorial.corpoica@corpoica.org.co
Editora: Liliana Gaona García
Corrección de estilo: Edwin Daniel Algarra Suárez
Diagramación: Studio Swamp S.A.S.
Impresión: Digiprint Editores
Impreso en Bogotá, D. C., Colombia, marzo 2017

Citación sugerida: Dorado-Guerra D, Grajales-Guzmán L.C,
Rebolledo-Roa A. 2016. Requerimientos hídricos del cultivo de
aguacate (*Persea americana*) variedad Hass en zonas productoras
de Colombia. Mosquera, Colombia: [Corpoica] Corporación
Colombiana de Investigación Agropecuaria.

Cláusula de responsabilidad: Corpoica no es responsable de las
opiniones e 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, declarando 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.

Línea de atención al cliente: 018000121515
atencionalcliente@corpoica.org.co
www.corpoica.org.co



https://co.creativecommons.org/?page_id=13

Contenido

| | |
|---|-----------|
| Agradecimientos | 11 |
| Introducción | 13 |
| Capítulo I | |
| Generalidades del cultivo | 15 |
| Origen del aguacate | 15 |
| Contexto general | 16 |
| Requerimientos hídricos en aguacate | 17 |
| Capítulo II | |
| Manejo del riego en aguacate Hass | 19 |
| Tecnología de riego en aguacate | 20 |
| Programación de riego | 21 |
| Registro de variables climáticas y cálculo de la evapotranspiración de referencia | 22 |
| Cálculo de la evapotranspiración del cultivo | 24 |
| Cálculo de la precipitación efectiva | 24 |
| Control de agua en el suelo | 25 |
| Necesidades de riego neta | 27 |
| Volumen y tiempo de riego | 28 |
| Ejemplo de programación de riego | 29 |
| Capítulo III | |
| Efecto del riego en la producción de aguacate Hass | 33 |
| Caracterización de las zonas de estudio | 33 |
| Suelos | 34 |
| Clima | 42 |

| | |
|---|-----------|
| Balance hídrico climático y cálculo de láminas de riego | 47 |
| Comportamiento de la humedad del suelo | 52 |
| Variables fisiológicas | 53 |
| Abscisión de flores y frutos | 54 |
| Crecimiento del fruto | 57 |
| Producción | 59 |
| Indicadores de uso eficiente del agua | 61 |
| Indicador de eficiencia en el uso del agua o productividad del agua | 62 |
| Análisis de costos | 65 |
| Herveo | 68 |
| Morales | 69 |
| Rionegro | 71 |
| Conclusiones | 73 |
| Los autores | 75 |
| Referencias | 77 |

Lista de figuras

| | | |
|------------------|---|----|
| Figura 1 | Sistema de riego instalado en campo | 21 |
| Figura 2 | Instalación de sensores de humedad | 27 |
| Figura 3 | Área de humedecimiento utilizando un sistema de riego por goteo | 29 |
| Figura 4 | Perfiles de suelo en cada localidad | 36 |
| Figura 5 | Balance hídrico multianual en las zonas de estudio | 45 |
| Figura 6 | Comparación de variables climáticas (temperatura y humedad relativa) obtenidas en el análisis multianual y las registradas por las estaciones en los huertos experimentales de las tres localidades | 46 |
| Figura 7 | Comportamiento de la velocidad del viento en el municipio de Morales (Cauca) | 47 |
| Figura 8 | Balance hídrico mensual en las tres localidades durante el desarrollo del experimento | 48 |
| Figura 9 | Momentos de aplicación de riego para cada zona de estudio | 51 |
| Figura 10 | Comportamiento de la humedad del suelo con riego y testigo en la localidad Morales (Cauca) | 53 |
| Figura 11 | Abscisión de flores y frutos en las tres zonas de estudio | 54 |
| Figura 12 | Número de estructuras caídas en las tres zonas de estudio | 56 |
| Figura 13 | Crecimiento del fruto en las zonas de estudio | 58 |
| Figura 14 | Relación costo-eficiencia de aplicación de los tratamientos de riego para la localidad de Herveo | 68 |

| | | |
|------------------|--|-----------|
| Figura 15 | Relación costo-eficiencia de aplicación de los tratamientos de riego de la localidad de Morales | 70 |
| Figura 16 | Relación costo-eficiencia de aplicación de los tratamientos de riego para la localidad de Rionegro | 72 |



Lista de tablas

| | | |
|-----------------|---|-----------|
| Tabla 1 | Coeficientes del cultivo utilizado en aguacate | 24 |
| Tabla 2 | Valores diarios de Pe y ETo | 30 |
| Tabla 3 | Resultados obtenidos de balance hídrico | 31 |
| Tabla 4 | Generalidades de los huertos experimentales | 34 |
| Tabla 5 | Resultados de los análisis físicos, en la finca Los Arrayanes | 37 |
| Tabla 6 | Resultados de análisis físico de suelos, en la finca La Escondida | 38 |
| Tabla 7 | Resultados de análisis físico de suelos. Finca El Recuerdo | 40 |
| Tabla 8 | Resultados obtenidos de los análisis químicos de suelos de fincas experimentales | 41 |
| Tabla 9 | Resultados de la prueba de bulbo húmedo en las tres zonas | 42 |
| Tabla 10 | Características climáticas históricas de las tres zonas de estudio | 44 |
| Tabla 11 | Láminas de riego y volumen aplicado por árbol para los ciclos 2014 y 2015 en las tres localidades | 50 |
| Tabla 12 | Efecto de tratamiento de riego en el rendimiento del cultivo de aguacate Hass en las tres zonas de estudio, utilizando la prueba Duncan | 60 |
| Tabla 13 | Uso eficiente del agua en Herveo, Tolima | 63 |
| Tabla 14 | Uso eficiente del agua en Morales, Cauca | 63 |
| Tabla 15 | Uso eficiente del agua en Rionegro, Antioquia | 64 |
| Tabla 16 | Variables para evaluación económica | 67 |

| | | |
|-----------------|---|-----------|
| Tabla 17 | Valor presente neto y relación costo-eficiencia para cada uno de los tratamientos en la localidad de Herveo | 69 |
| Tabla 18 | Valor presente neto y relación costo-eficiencia para cada uno de los tratamientos en la localidad de Morales | 70 |
| Tabla 19 | Valor presente neto y relación costo-eficiencia para cada uno de los tratamientos en la localidad de Rionegro | 71 |

Agradecimientos

La Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica) agradece a Colciencias por el apoyo financiero para el desarrollo del programa Manejo integrado del cultivo de aguacate (*Persea americana* Mill) var. Hass para incrementar la calidad y el rendimiento en zonas productoras de Colombia, de donde se obtuvo la información para realizar este documento.

También se agradece a las asociaciones de productores Asfruher y Hass Colombia, por su apoyo y aporte en la realización del programa en Herveo (Tolima), Rionegro (Antioquia) y Morales (Cauca).

De igual manera, se brinda un reconocimiento a los pasantes, tesistas y profesionales que hicieron un seguimiento detallado, así como a los investigadores y auxiliares de investigación por su apoyo, a los propietarios de los huertos, al personal de laboratorio y administrativo, quienes hicieron posible la finalización de esta investigación.



Introducción

El desarrollo de la agricultura, como actividad productiva, está influenciada por la disponibilidad del recurso hídrico, limitando o facilitando su desarrollo. La degradación ambiental, la distribución desigual de los recursos, la tenencia del agua, el cambio climático y la variabilidad climática a las que se enfrenta hoy la humanidad acarrearán grandes problemas en la agricultura, la agroindustria, las cadenas de abastecimiento y la seguridad alimentaria (Fischer et al. 2005). Dichos elementos presionan fuertemente el uso de los recursos naturales, situación que se encuentra supeditada al continuo crecimiento poblacional. De ahí la importancia de establecer una gestión eficaz de los recursos, siendo el agua cada vez más esencial en la sostenibilidad de la vida humana.

En Colombia, la agricultura posee el 46,6 % del total de la demanda hídrica nacional (Ideam 2015a), por lo que uno de los enfoques fundamentales de la investigación agrícola es obtener mejores producciones con un óptimo manejo del recurso hídrico en los cultivos. En el país, este ha sido uno de los temas centrales para la formulación de políticas que propendan por el desarrollo sostenible (DNP 2010).

Las políticas nacionales enfatizan la necesidad de tecnificar la agricultura para lograr un uso óptimo del agua y aumentar la producción. El riego, por su parte, ha permitido a los agricultores mejorar el rendimiento de los cultivos y reducir la dependencia de las precipitaciones, aumentando así su producción media (Tubiello 2005). Es fundamental que los productores incursionen en el uso de tecnologías y mecanismos para hacer un uso racional del agua, es decir, aplicar solo el volumen requerido, en el momento adecuado y con la frecuencia apropiada (Pérez et al. 2009).



Uno de los enfoques primordiales de la investigación en frutales es el de los requerimientos hídricos del cultivo, que permitan el manejo del riego para mejorar la producción y optimizar la administración de los recursos naturales (Tafur et al. 2006). Dentro de los frutales, el aguacate ocupa el segundo lugar en el renglón frutícola del país, después de los cítricos, con un área de 58.784 ha y una producción promedio nacional de 274.330 t (DANE 2016).

La variedad Hass se ha posicionado en el mercado internacional por la calidad comercial del fruto, usado para el consumo en fresco y la industria, gracias a su gran aporte de aminoácidos esenciales y vitaminas (Ortega 2003). Ante esta situación, se han incrementado tanto el área cultivada como la producción en todos los países productores, principalmente en México, Chile, España, Sudáfrica, Australia, Perú, Israel y Estados Unidos. Por su parte, Colombia ha elevado su presencia en el mercado internacional con una participación del 4,29% en el 2009, y en el 2010 pasó a ser el quinto productor de aguacate en el mundo, contribuyendo con un 5,3% de la producción mundial (FAOSTAT 2011).

Es preciso destacar la importancia que tiene el manejo del agua en el cultivo de aguacate, si se tiene en cuenta que su disponibilidad en ciertas regiones puede significar la diferencia entre la obtención de 6 t/ha de fruta o el ascenso a 12 t/ha, que incluso puede ser mayor (Anguiano et al. 2007). De acuerdo con Whiley et al. (1988) y Bower (1988), al no suplir los requerimientos de agua, las mayores pérdidas pueden darse en la floración y desarrollo de frutos; además, el aporte hídrico garantiza buen tamaño de fruta (Lahav y Kalmar 1983). El aguacate Hass tiene un rendimiento potencial de más de 30 t/ha, pero debido a las altas tasas de abscisión de flores y frutos el rendimiento promedio mundial se encuentra por debajo de las 10 t/ha (Garner y Lovatt 2008). Silber et al. (2012) encontraron que una frecuencia adecuada de riego es crucial para una adecuada fructificación.

Con el fin de entregar una herramienta útil a los productores y asistentes técnicos del cultivo de aguacate Hass, se presenta este documento con criterios técnicos que permitan dar un uso eficiente del recurso hídrico. Para su realización, se revisaron los avances de investigación reportados en diferentes zonas sobre el manejo del riego en aguacate, y se presentan los resultados obtenidos en el programa de investigación “Manejo integrado del cultivo de aguacate (*Persea americana* Mill) var. Hass, para incrementar la calidad y el rendimiento en zonas productoras de Colombia”, financiado con recursos de Colciencias.

Generalidades del cultivo

El aguacate pertenece a la familia Lauraceae y, actualmente, el género *Persea* contiene alrededor de 85 especies, cuya mayoría se encuentra desde el sur de los Estados Unidos de Norteamérica (*P. borbonia*) hasta Chile (*P. lingue*) (Barrientos-Priego y López-López 1998).

La variedad Hass es la más cultivada en el mundo. Sus frutos son esféricos, ovalados, con corteza gruesa y quebradiza. La pulpa es suave, cremosa y de excelente sabor. La semilla es pequeña (muy adherida a la cavidad seminal) y se pela fácilmente. Dependiendo del estado de madurez, el fruto presenta un color que va desde verde opaco (estados inmaduros) hasta morado oscuro (madurez de consumo) (Newett et al. 2007).

Origen del aguacate

El aguacate es originario de América y su domesticación tuvo lugar en el centro y este de México y Guatemala, zona incluida dentro de la región conocida como Mesoamérica (Williams 1977). El aguacate ha hecho parte de la dieta del hombre americano desde hace mucho tiempo y la prueba más antigua de ello fue encontrada en una cueva en Coxcatlán —región de Tehuacán, en Puebla, México—, hallazgo que data entre el 8000 y el 7000 a. de C. (Smith 1966). En el *Códice Florentino* se mencionan tres tipos de aguacate: ‘aoacatl’, ‘tlacacolaocatl’ y ‘quilaoacatl’, que de acuerdo a su descripción podrían corresponder a *Persea americana* var. *Drymifolia* (raza



mexicana), *P. americana* var. Americana (raza antillana) y *P. americana* var. Guatemalensis (raza guatemalteca), respectivamente (Barrientos-Priego y López-López 1998).

El aguacate pertenece al género *Persea*, que a su vez se divide en dos subgéneros: *Persea* y *Eriodaphne* (Kopp 1966). La especie *P. americana* Mill. pertenece al subgénero *Persea*, que se conoce como los verdaderos aguacates y que son de un tamaño mayor que los del otro subgénero. También se encuentran en este grupo *P. nubigena*, *P. steyermarkii*, *P. schiedeana* y *P. floccosa* (Barrientos-Priego y López-López 1998).

En 1935, Rudolph Hass, en Habra Heights (California), patentó la variedad Hass, debido a la calidad de sus frutos, alto rendimiento y maduración tardía, comparada con otras variedades cultivadas en la época (Whiley et al. 2002). La variedad Hass pertenece a la raza guatemalteca: *P. nubigena* var. Guatemalensis.

Contexto general

A nivel mundial, Colombia se encuentra ubicada en el cuarto lugar de producción de aguacates verdes y Hass con 303.340 t reportadas en 2013, y un rendimiento promedio de 9,4 t/ha. Aun así, no tiene participación en el comercio internacional, siendo superada ampliamente por países con menores niveles de producción como Chile, uno de los más importantes proveedores de esta fruta a nivel mundial, y Perú, que registra cifras destacadas en el mercado internacional (Velásquez 2006).

Las regiones productoras de aguacate más destacadas en Colombia son: Tolima, con 9.838 ha; el Oriente Antioqueño, con aproximadamente 7.497 ha; el Departamento del Cauca, donde existen 420 ha, y el área restante está distribuida en los departamentos del Eje Cafetero (Quindío, Caldas y Risaralda), Bolívar, Valle del Cauca y Santander (Agronet 2014). El área sembrada de aguacate Hass en Colombia pasó de 30.000 ha en 2010 a 50.292 ha en 2015. Además, Colombia ocupó el tercer lugar en la producción mundial de aguacate con el 6% de la producción total, con un rendimiento promedio de 9,5 t/ha (FAOSTAT 2011).

Requerimientos hídricos en aguacate

Teniendo en cuenta que el manejo del agua en un cultivo es un factor influyente en la producción de este, se han realizado diversas investigaciones enfocadas hacia el estudio de los requerimientos hídricos del cultivo de aguacate. Diferentes autores han evidenciado que la evaluación de láminas de riego, basadas en la evapotranspiración de referencia (E_{To}), permite tener una aproximación real al coeficiente del cultivo (K_c) y, por tanto, a los requerimientos hídricos de este.

Estudios realizados en California por Faber et al. (1995) indican que el cultivo de aguacate Hass presenta los máximos rendimientos cuando se aplican láminas de agua equivalentes al 70 % de E_{To} ($K_c = 0,7$), mientras que en los tratamientos donde se aplicaron cantidades de agua mayores, equivalentes al 110 % de E_{To} ($K_c = 1,1$), los rendimientos disminuyen en aproximadamente un 50 %. Mediante la evaluación de láminas de riego y análisis de información climática, Bozzolo (1993) estimó, para dos huertos de aguacate Hass, coeficientes del cultivo de 0,5 en primavera, 0,65 en verano y 0,55 en otoño, para las condiciones de Quillota (Chile). Entre tanto, Cardemil (1999) bajo las mismas condiciones definió coeficientes de 0,6 a 0,7 entre los meses de julio a noviembre, y de 0,8 a 0,9 en verano.

Tapia et al. (2007) determinaron, para las condiciones de Michoacán (México), que el requerimiento del aguacate en el período de estiaje (diciembre a mayo) varía de acuerdo a la ubicación de las plantaciones en cuanto a clima y altitud, así como con las características de drenaje del suelo.

Salazar-García (2002) hace énfasis en la necesidad de desarrollar investigaciones locales para definir las soluciones a problemas específicos en los huertos productores y ser cuidadosos en la aplicación de tecnologías provenientes de otro país, ya que las recomendaciones pueden ser exclusivas para esas condiciones.



Manejo del riego en aguacate Hass

El suelo, la planta y la atmósfera constituyen un sistema continuo. La planta conduce el agua del suelo hacia las estomas liberándola a la atmósfera, en un proceso llamado transpiración, que permite el ascenso de agua en las plantas, desde el suelo hasta las hojas, en respuesta al gradiente de potencial hídrico entre la atmósfera y la hoja, en tanto que el agua se mueve desde las zonas con mayor potencial hídrico hacia las zonas con menor potencial. Al darse simultáneamente evaporación de agua desde la superficie del suelo, se ha definido el término evapotranspiración (ET) como el agua que regresa a la atmósfera desde las hojas de las plantas cuando es transpirada y la evaporada desde la superficie del suelo (Ferreyra y Sellés 2011).

La evaporación, la transpiración y la evapotranspiración son fundamentales para estimar los requisitos de riego y para programarlo. Para determinar los requisitos de riego, es necesario estimar la evapotranspiración del cultivo (ETc) a través de mediciones directamente en el campo o utilizando datos meteorológicos. Las mediciones directamente en el campo son muy costosas, utilizadas principalmente para calibrar los métodos que estiman la ET con datos climáticos.

Hay muchos factores que influyen en la magnitud de la ETc, como el tipo de suelo, el nivel de humedad, las prácticas culturales y la variedad dentro de cada cultivo; el conocimiento de la ETc es un valor importante para el manejo del riego, por el ahorro de agua e incremento en el rendimiento de los cultivos (Jiménez 1992).



Tecnología de riego en aguacate

Para decidir el caudal del gotero, así como su distanciamiento con otros y el tiempo en el que se alcanza la profundidad efectiva, es conveniente realizar una prueba de bulbo húmedo, que consiste en simular el funcionamiento de un gotero utilizando el principio del frasco de Mariotte —recipiente con agua, con dos pequeños agujeros, uno lateral y uno inferior—, que mantiene el caudal constante, aun cuando el nivel de agua desciende. De este modo, se mide el bulbo húmedo y la profundidad a la que llega cierto volumen de agua por un tiempo determinado (Ríos 2003).

Para ello, se dispone la botella de Mariotte diseñada con un caudal específico sobre un soporte fijo que no intervenga en el flujo del agua en el suelo, dejándola por periodos determinados. Al finalizar cada periodo, se retira la botella y se mide el perímetro mojado y la profundidad del bulbo, abriendo una calicata en el centro de este, hasta donde haya llegado la humedad.

En el estudio, se realizaron pruebas de bulbo húmedo en las localidades de Herveo (Tolima), Rionegro (Antioquia) y Morales (Cauca), encontrando que el gotero de 8 L/h es el que más se ajusta a los requerimientos y tipo de suelo, pues a los 45 minutos de riego se alcanzó la profundidad efectiva del cultivo en las tres localidades, lo que significa que el tiempo de riego no debe exceder los 45 minutos para no perder agua por infiltración. El diámetro de humedecimiento promedio de las tres localidades fue de 40 cm, que no alcanza a cubrir el área total de raíces del árbol, razón por la cual, y en concertación con el doctor Harold Tafur (profesor de la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, experto en ingeniería de riego), se decidió que la mejor forma de distribuir el riego y así poder cubrir uniformemente el área radicular era poniendo dos aros que rodeen el árbol, con goteros ubicados de tal manera que se pueda generar una franja húmeda adecuada para una correcta aplicación del agua.

Teniendo esta información, se instaló un sistema de riego localizado de alta frecuencia, con goteros autocompensados y antidrenantes (caudal: 8 L/h), para evitar que los cambios de presión generados en el sistema influyan sobre el caudal a descargar de cada gotero. Por árbol se instalaron dos collares con 10 goteros cada uno, distanciados a 1,0 m y 1,4 m del tronco, y una separación entre goteros de 0,6 m y 0,8 m, respectivamente, como se puede observar en la figura 1.



Foto: Diana Dorado

Figura 1. Sistema de riego instalado en campo.

Programación de riego

El éxito de aplicar riego depende del conocimiento de la cantidad de agua que requiere un cultivo y del momento oportuno para aplicarla, permitiendo aumentar los rendimientos y calidad del cultivo, además de ahorrar agua y energía. Para ello, se requiere realizar la programación del riego de acuerdo al requerimiento hídrico del cultivo, en la cantidad y con la frecuencia adecuadas. Para programar el riego, se deben tener en cuenta las condiciones climáticas, así como las características del cultivo, el suelo y el sistema de riego que se va a utilizar (Ferreyyra et al. 2007).

Los requerimientos de agua de un cultivo o la ETC están en función de la ETO y el K_c , para cada etapa de desarrollo fisiológico. Experimentalmente, la ETC se determina utilizando dispositivos específicos y mediciones precisas de variables ambientales, incluido el balance de agua en el suelo. Las metodologías utilizadas en campo son: i) balance de agua en el suelo, ii) balance de energía y micro



climáticos, y iii) método de transferencia de masa (Allen et al. 2006). Uno de los métodos utilizados para calcular los requerimientos hídricos de la planta es el balance hídrico, cuyos pasos a tener en cuenta para la programación de riego en aguacate Hass son:

Registro de variables climáticas y cálculo de la evapotranspiración de referencia

El clima define la demanda evaporativa de la atmósfera, que puede ser determinada a partir de la ETO. En consecuencia, la ETO es independiente de las características de un cultivo particular. Para determinar la evapotranspiración directamente en campo, se requieren mediciones precisas del balance de agua en el suelo o de parámetros microclimáticos, utilizando los equipos indicados, además de personal capacitado en investigación. El cálculo directo de ETO en campo es dispendioso, pero se requiere para ajustar las estimaciones alcanzadas con métodos indirectos o modelos. Para su cálculo, se han desarrollado diferentes ecuaciones empíricas o semiempíricas, utilizando la información climática (Allen et al. 2006).

Se han desarrollado estudios en los que se comparan los métodos de campo con las diferentes ecuaciones para establecer cuál es la que más se ajusta a las condiciones locales. Algunas ecuaciones son solo válidas para condiciones específicas y no se pueden aplicar en zonas diferentes. Jensen et al. (1990) encontraron que la ecuación de Penman Monteith (Penman 1948; Monteith 1965) y Hargreaves Samani (1982; 1985) puede ser empleada con un buen ajuste en el cálculo de ETO en el trópico. Santana y Peña (2010) reportaron que las fórmulas que mejor reflejaron el comportamiento real de la ETO en un clima húmedo en el trópico fueron la de Hargreaves Samani (1982; 1985), Penman Monteith, Turc (1961) y Blaney y Morin (1942). Como resultado de una consulta de expertos llevada a cabo en mayo de 1990, el método FAO Penman-Monteith se recomienda actualmente como el método estándar para la definición y el cálculo de la ETO (Allen et al. 2006).

A la ecuación de Penman-Monteith se vinculan las características del cultivo de referencia y la ecuación queda definida como FAO Penman-Monteith (ecuación 1).

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0,34u_2)} \quad (\text{Ecuación 1})$$

En esta ecuación, ET_0 es la evapotranspiración de referencia ($\text{mm}/\text{día}^{-1}$); R_n es la radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{día}^{-1}$); G es el flujo de calor del suelo ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{día}^{-1}$); T es la temperatura media del aire a 2 m de altura ($^{\circ}\text{C}$); u_2 es la velocidad del viento a 2 m de altura (m/s^{-1}); e_s es la presión de vapor de saturación (kPa); e_a es la presión real de vapor (kPa); $e_s - e_a$ es el déficit de presión de vapor (kPa); Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{k}/\text{Pa}/^{\circ}\text{C}^{-1}$), y γ es la constante psicrométrica ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}^{-1}$).

La FAO ha desarrollado *softwares* libres utilizando el modelo de Penman-Monteith para el cálculo de la ET_0 , como CropWat o EToCalculator. El modelo utiliza datos climáticos de radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento (Allen et al. 2006). Las variables de entrada de los programas son:

Localización: el *software* EToCalculator requiere de la ubicación geográfica (latitud norte y sur, más altura sobre el nivel del mar) del sitio donde se desarrolla el experimento para ajustar el cálculo de la radiación extraterrestre (R_a) y la duración máxima de la insolación (Allen et al. 2006)

Temperatura: se requieren los datos de temperatura diaria (promedio) máxima y mínima. Cuando solo se tiene disponibilidad del promedio de la temperatura diaria, el *software* puede calcular ET_0 , pero es posible que subestime su valor debido a que la relación entre la presión de vapor de saturación y la temperatura no es lineal (Allen et al. 2006).

Humedad: el valor de la presión real (promedio) diaria de vapor (e_a), en kilopascales (kPa), se requiere como dato de entrada para la aplicación de la ecuación FAO Penman-Monteith. En caso de que los valores de presión real de vapor no estén disponibles, se pueden utilizar los datos de la humedad relativa media (%) (Allen et al. 2006).

Radiación: la radiación neta diaria (promedio) esta expresada en megajoules por metro cuadrado por día ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{día}^{-1}$). Estos datos no están disponibles comúnmente en forma directa, pero pueden derivarse de la radiación de onda corta (promedio) —medida con un pirómetro— o de la duración real diaria (promedio) del sol brillante (horas/día) —medida con el heliógrafo— (Allen et al. 2006).

Viento: para la aplicación de la ecuación FAO Penman-Monteith, se requiere contar con la velocidad del viento (promedio) diaria en metros por segundo



(m/s) medida a 2 m de altura sobre el nivel del suelo. Es importante verificar la altura a la que se mide la velocidad del viento, pues velocidades del viento medidas a diversas alturas sobre la superficie del suelo presentan con seguridad valores diferentes (Allen et al. 2006).

Cálculo de la evapotranspiración del cultivo

La ETC se define como el producto entre la ETO y el Kc (ecuación 2). El Kc describe las variaciones de la cantidad de agua que las plantas extraen del suelo a medida que se van desarrollando, desde la siembra hasta la recolección (Doorenbos y Pruitt 1977). En la tabla 1, se presentan Kc utilizados en aguacate, en las zonas cercanas a Colombia.

$$ETC = ETO \times Kc \quad (\text{Ecuación 2})$$

Tabla 1. Coeficientes del cultivo utilizado en aguacate

| Procedencia investigación | Kc inicial | Kc medio | Kc final |
|---------------------------|------------|----------|----------|
| FAO, 2006* | 0,6 | 0,85 | 0,75 |
| Lima, 2015** | | 1,125 | |
| Aconcagua, 2007*** | | 0,72 | |

*Doorenbos y Pruitt (1977). **Vásquez et al. (2015). ***Ferreira et al. (2007).
Fuente: Elaboración propia

Cálculo de la precipitación efectiva

Solo una porción del agua de lluvia que cae sobre la superficie del suelo puede ser utilizada por las plantas. Hay una parte de la precipitación que se infiltra a través de la superficie del suelo y otra que fluye sobre él en forma de escorrentía superficial, dependiendo de las propiedades hidrofísicas del suelo. Cuando la lluvia cesa, parte del agua que se encuentra en la superficie del suelo se evapora directamente a la atmósfera, mientras que el resto se infiltra lentamente en el interior del suelo (UNESCO c2016). Del total del agua que se infiltra, parte de

ella percola por debajo de la zona de raíces, mientras que el resto permanece almacenado en dicha zona y podría ser utilizada por las plantas; a esta porción de agua se le denomina *precipitación efectiva* (Pe). Esta cantidad de agua es la que estará disponible para responder a las necesidades de agua de la planta (FAO 2000). La Pe se determina por experimentos en campo, por medio de ajuste de ecuaciones, o con ayuda de *software*, como Cropwat, diseñado por la FAO.

Control de agua en el suelo

La humedad en el suelo es uno de los factores que más condicionan el desarrollo normal de los cultivos. Un exceso o un déficit de esta en el suelo afecta el rendimiento de la mayoría de los cultivos. Cuando el problema es por exceso de humedad, el drenaje es la solución adecuada; cuando es por defecto de esta, la alternativa es el riego (Shaxson y Barber 2005). Tanto la proporción en que se encuentran los materiales que componen el suelo como la distribución de tamaño de poros y de agregados son fundamentales en el movimiento del agua y su retención en el suelo (Jaramillo 2002).

El agua queda adherida en las partículas del suelo siendo sometida a la acción de una serie de fuerzas que afectan su retención (Jaramillo 2002). El movimiento del agua en el suelo se da por el potencial hídrico, que se puede considerar como “la cantidad de trabajo que es preciso aplicar para transportar reversible e isotérmicamente la unidad de cantidad de agua desde una situación estándar de referencia hasta el punto del suelo considerado” (Pizarro 1996, 87). El potencial hídrico o la energía con la que el agua es retenida en el suelo varían para cada tipo de suelo, teniendo valores diferentes para un mismo contenido de humedad; esta relación se conoce como *curva de retención de humedad* (Jaramillo 2002).

La curva de retención de humedad sirve para realizar la conversión entre el contenido de humedad y la succión de humedad. El contenido de humedad es la base para los estudios de balance de agua. En la curva de retención se determina cuál es la humedad para la capacidad de campo y punto de marchitez permanente. La capacidad de campo es la máxima capacidad de retención de agua de un suelo sin problemas de drenaje y se alcanza, según la textura del suelo, entre 24 y 72 horas después de un riego pesado; esta agua está retenida en el suelo a una tensión de -0,1 bar para suelos de textura gruesa. Por su parte, el punto de marchitez permanente es el punto de humedad mínima en el que una planta no puede seguir extrayendo agua del suelo y no puede



recuperarse de la pérdida hídrica; se estima que este punto se encuentra a una presión de -15 bar.

Es posible medir la retención de agua en el suelo o potencial hídrico con distintos métodos; los más utilizados son tensiómetros y bloques de yeso. Debido a que el rango de datos de estos sistemas es limitado (entre 0 y 0,8 bar), los datos de humedad serían aproximados, debido a la histéresis entre la rama de humectación y de drenaje de la curva de retención de humedad del suelo. El requerimiento hídrico, dependiendo del tipo de suelo y cultivo, puede estar por encima de la capacidad de campo, por lo tanto, es más conveniente realizar el control de humedad instantáneo del suelo con sensores.

El monitorear la humedad del suelo ayuda a igualar los requerimientos de agua del cultivo con la cantidad aplicada con el riego, bien para evitar pérdidas de agua excesivas por percolación profunda o por escurrimientos, bien para evitar aplicar una cantidad insuficiente. El exceso de irrigación puede incrementar el consumo de energía y los costos de agua, así como aumentar el movimiento de fertilizantes por debajo de la zona radicular, producir erosión, y transporte de suelo y partículas de químicos a los canales de drenaje. El riego insuficiente puede reducir la producción de las cosechas (Enciso et al. 2007). Existen diferentes métodos de medida de humedad del suelo: gravimetría, sonda de neutrones, sonda TDR y sonda FDR, entre otros, y cada método plantea una serie de ventajas e inconvenientes.

Unos de los métodos utilizados para medir humedad son los sensores electrónicos, que pueden ser tensiómetros electrónicos con punta de porcelana —indican el esfuerzo que han de realizar las raíces para extraer del suelo la humedad que necesita el cultivo— o sondas eléctricas de dos o tres varillas —generan una onda electromagnética produciendo un campo electromagnético entre las varillas—. A partir de la frecuencia resultante, el sensor mide la capacitancia (C) y la conductancia (G) del suelo que se encuentra entre las varillas, y de esta forma determina la humedad del suelo. En este trabajo se seleccionó esta última metodología para medir humedad, concretamente se hizo uso del equipo medidor de humedad ML3 TethaProbe (figura 2).

Para la instalación en campo, se verificó que los canales por donde se transmite la señal de cada sensor estuviera identificado adecuadamente; luego, se procedió a cavar un hoyo en el suelo de aproximadamente 50 cm de profundidad, cercano a un emisor de riego que no tuviera interferencia de

flujo de agua, para no confundir las mediciones. Los sensores se insertaron en la pared de suelo, donde hay continuidad en el flujo de agua y hubo menor alteración del suelo. En un árbol de cada tratamiento se instalaron tres sensores a 15, 30 y 45 cm de profundidad (figura 2): los dos primeros se instalaron para realizar seguimiento a la humedad del suelo disponible para el cultivo, mientras que el último se instaló para verificar que no se perdiera agua en el riego por debajo de la profundidad efectiva.



Foto: Diana Dorado

Figura 2. Instalación de sensores de humedad.

Necesidades de riego neta

Las necesidades de riego netas (NRN) se definen como la cantidad de agua necesaria para que los cultivos desarrollen su máximo potencial productivo, en función de la cantidad de agua necesaria para el desarrollo de sus procesos fisiológicos, manteniendo los otros factores de producción constantes. Al aplicar riego, se deben conocer las propiedades físicas del suelo (densidad aparente, conductividad hidráulica, profundidad efectiva, curva de retención de humedad, etc.), el comportamiento histórico de las variables climáticas para establecer los meses donde es necesario regar y el comportamiento fisiológico del cultivo.

Para el cálculo de las necesidades de riego, es necesario realizar la lectura de las variables climáticas (temperatura máxima y mínima, humedad relativa, precipitación, velocidad del viento y radiación solar) y el uso de sensores de humedad temprano en la mañana a la misma hora. La NRN se define como la



diferencia entre la ET_c y P_e (ecuación 3), cuyo cálculo se debe realizar diariamente; si la ET_c del cultivo es mayor al aporte de precipitación, se debe regar.

$$Nrr = P_e - ET_c \quad (\text{Ecuación 3})$$

La necesidad de riego real (NRR) que se aplica depende del sistema de riego y del coeficiente de uniformidad (CU); para riego por goteo, se considera un CU del 90%. La ecuación 4 presenta la forma como se calcula las NRR.

$$NRR = NRR / CU \quad (\text{Ecuación 4})$$

Volumen y tiempo de riego

Se debe encontrar el volumen de agua requerido por la planta, partiendo de las NRR, teniendo en cuenta el área de humedecimiento del sistema de riego que se esté utilizando, para lo cual se utiliza la ecuación 5. En la figura 3, se muestra el área de humedecimiento, utilizando un sistema de riego por goteo instalado en forma de anillo.

$$V(L) = Nrr \times 1 \left(\frac{L}{m^2 \text{ día}} \right) \times Area_{planta} \quad (\text{Ecuación 5})$$

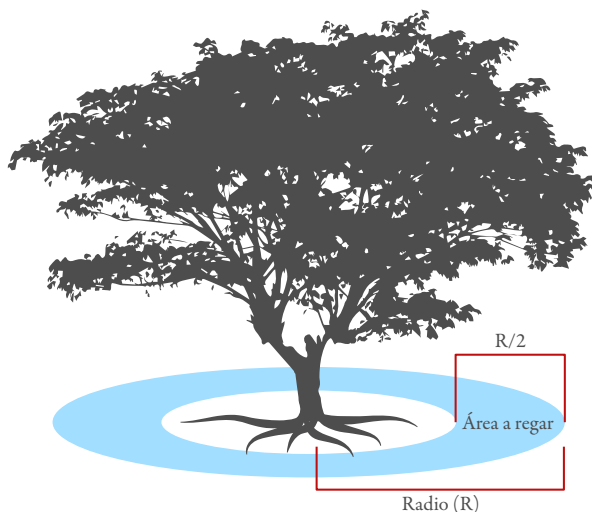


Figura 3. Área de humedecimiento utilizando un sistema de riego por goteo.
Fuente: Elaboración propia

El tiempo de riego depende del volumen que se va a aplicar, así como del caudal y número de emisores por planta (ecuación 6)

$$t(\text{horas}) = \frac{V}{Q_{\text{Gotero}} \times N.^{\circ} \text{Goteros}_{\text{árbol}}} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Ejemplo de programación de riego

Para programar el riego, se calcula la lámina neta, el volumen y el tiempo a regar, con una frecuencia diaria en un cultivo de aguacate, utilizando la siguiente información:

Coefficiente del aguacate: K_c (Allen et al. 2006) = 0,85

Coefficiente de uniformidad para riego por goteo: $CU = 0,9$

Área efectiva de riego A húmeda = 4 m^2

Caudal de cada gotero $Q_{\text{gotero}} = 8 \text{ L/h}$

Número de goteros por árbol = 20



En la tabla 2 se muestran los datos de Pe y ETO.

Tabla 2. Valores diarios de Pe y eto

| Día | ETO (mm) | Pe(mm) |
|-----|----------|--------|
| 1 | 4,0 | 0,0 |
| 2 | 3,6 | 1,0 |
| 3 | 4,0 | 5,0 |
| 4 | 4,4 | 0,0 |
| 5 | 3,8 | 2,0 |

Fuente: Elaboración propia

Desarrollo

A continuación, se reemplazarán los valores expuestos en las ecuaciones dadas con anterioridad, con el fin de determinar el programa de riego para el ejemplo en cuestión.

- a. Cálculo de evapotranspiración del cultivo (ETC) (ecuación 1)

$$ETC \text{ día } 1 = 4 \text{ mm} * 0,85 = 3,4 \text{ mm}$$

- b. Cálculo de las necesidades de riego netas (NRN) (ecuación 3)

$$Necesidades \text{ de riego (NRN) día } 1 = 0 \text{ mm} - 3,4 \text{ mm} = -3,4 \text{ mm}$$

Si no se repone lo que se consumió el cultivo el día 1, se debe reponer en el día 2

$$Necesidades \text{ de riego día } 2 = (P \text{ día } 2 - ETC \text{ día } 2) + Necesidades \text{ de riego día } 1$$

Después de que se repone el agua que consumió el cultivo, se empieza el balance como el día uno.

- c. Necesidades de riego reales (NRR) (ecuación 4)

$$NRR \text{ (mm) día } 1 = 3,4 \text{ mm} / 0,9 = 3,78 \text{ mm}$$

d. Cálculo de volumen de riego (ecuación 5)

$$V(L) = 3,78 \text{ mm} * 4 \text{ m}^2 * (1 \text{ L/m}^2) = 15,11 \text{ L}$$

e. Cálculo de tiempo de riego (ecuación 6)

$$t(\text{min}) = \frac{15,11 \text{ L}}{8 \text{ L/hora} * 20} * 60 \frac{\text{min}}{\text{hora}} = 6 \text{ min}$$

Con la información dada y después de aplicar las ecuaciones en secuencia, se obtienen los resultados que se muestran en la tabla 3. En el día uno, para suplir una demanda de 15,11 L/día/árbol, teniendo un caudal de descarga de 160 L/h repartidos uniformemente en el plato del árbol en dos anillos de riego (figura 1), se debe dejar funcionando el riego por espacio de 6 minutos. En el día tres, no fue necesario regar, porque el aporte de precipitación fue mayor a los requerimientos hídricos de la planta.

Tabla 3. Resultados obtenidos de balance hídrico

| Día | ET _o (mm) | K _c | ET _c (mm/ día) | P _e (mm) | NRN (mm) | Riego (Sí/No) | NRR (mm) | V (L) | t (min) |
|-----|-------------------------|----------------|---------------------------------|------------------------|-------------|------------------|-------------|-------|------------|
| 1 | 4,0 | 0,85 | 3,40 | 0,00 | -3,40 | Sí | 3,78 | 15,11 | 6 |
| 2 | 3,6 | 0,85 | 3,06 | 1,00 | -2,06 | Sí | 2,29 | 9,16 | 3 |
| 3 | 4,0 | 0,85 | 3,40 | 5,00 | 1,60 | No | 0,00 | 0,00 | 0 |
| 4 | 4,4 | 0,85 | 3,74 | 0,00 | -2,14 | Sí | 2,38 | 9,51 | 4 |
| 5 | 3,8 | 0,85 | 3,23 | 2,00 | -1,23 | Sí | 1,37 | 5,47 | 2 |

Fuente: Elaboración propia



Efecto del riego en la producción de aguacate Hass

Para evaluar el efecto del riego y llegar a la aproximación de los requerimientos hídricos en producción del cultivo de aguacate Hass en zonas productoras de Colombia, se establecieron tres tratamientos de riego definidos a partir de la ETo de los sitios evaluados, así: L1: 50 %, L2: 75 %, L3: 100 % y el testigo. El riego tuvo una aplicación de un día de por medio, sustituyendo el consumo generado por ETo. Con el fin de establecer las necesidades de riego, se realizó un balance hídrico con la metodología utilizada por Doorenbos y Pruitt (1977). Para medir la ETo diaria, se utilizó el método FAO-Penman Monteith. Además, se instaló un sistema de riego por goteo con dos líneas de riego en forma de collar alrededor del árbol; cada collar cuenta con 10 goteros de caudal 8 L/h, teniendo en total un caudal de descarga de 160 L/h/árbol (figura 1).

Caracterización de las zonas de estudio

La investigación se desarrolló en tres departamentos de importancia en la producción de aguacate Hass, escogiendo un municipio representativo de la zona de producción de cada departamento, así: Morales (Cauca), Herveo (Tolima) y Rionegro (Antioquia). Los criterios para la selección de las parcelas experimentales se basaron en el área representativa del cultivo (mínimo 1 ha), los registros del manejo agronómico y producción, el buen



estado fitosanitario y el requisito de seis años de edad para garantizar una producción estable (tabla 4).

Tabla 4. Generalidades de los huertos experimentales

| Caracterización | Morales | Herveo | Rionegro |
|-----------------------|-----------------|----------------|----------------|
| Vereda | Carpintero | Tesoritos | Cabeceras |
| Ubicación geográfica | W 76° 37' 15,8" | W 75°12'10,5" | W 75°24'14,7" |
| | N 02° 48' 34,5" | N 05° 02'44,6" | N 06° 05'56,9" |
| Altitud (msnm) | 1.600 | 1.943 | 2.169 |
| Nombre de la finca | El Recuerdo | Los Arrayanes | La Escondida |
| Área de la finca (ha) | 4 | 3 | 14 |

Fuente: Elaboración propia

Suelos

La relación entre los materiales sólidos, líquidos y gaseosos que componen el suelo es fundamental en el movimiento del agua y su retención, lo que determina una serie de propiedades conocidas como *propiedades físicas del suelo*. Antes de tomar las muestras para análisis físico se realizó una calicata en cada lote experimental, con el fin de conocer el perfil del suelo, determinar a qué profundidad hay cambios en el perfil del este y decidir cuántas muestras tomar (Jaramillo 2002). La formulación de planes de fertilización se realizó con base en el análisis de suelos, el índice de balance y la extracción de elementos reportada por Salazar-García (2002).

Para el análisis químico del suelo se realizó un muestreo aleatorio en varios puntos de los lotes experimentales; después se mezclaron por profundidad, se empacaron y se rotularon. En el análisis físico, se tomaron muestras con anillos de 5 cm de largo en áreas contrastantes del lote experimental; posteriormente las muestras se extraen, se sellan y se marcan para enviar al laboratorio. Los análisis físicos y químicos de suelos se realizaron en el Laboratorio de Suelos de Corpoica.

Herveo

Los suelos de Herveo se clasifican dentro del orden Andisol, desarrollados a partir de materiales volcánicos (cenizas, magma, rocas, etc.). El material parental de los suelos andisoles les otorga características únicas y distintivas, llamadas *propiedades ándicas*, que se manifiestan en una baja densidad aparente, una alta carga variable y una alta capacidad de retención de fosfatos y de humedad (Arnalds y Stahr 2004). Los suelos de la zona se ubican dentro de la unidad MKBf1 consociación *Alic Hapludands*, que se conforma con los suelos *Alic Hapludands* y *Hydric Hapludands*, caracterizados por ser suelos profundos a superficiales, con alto contenido de materia orgánica, excesivo drenaje, texturas medias y ligeramente ácidos, ubicados en un relieve fuertemente quebrado a escarpado, de pendientes largas y empinadas (IGAC 2008b).

Química del suelo

El pH del suelo es clasificado como fuertemente ácido (5,5-5,9). Bisonó y Hernandez (2008) mencionan que el rango óptimo de pH para el desarrollo del cultivo es entre 5,5 y 7,5. El suelo presenta altos niveles de hierro (Fe) debido, principalmente, al material parental del que se origina este suelo, lo que a su vez ocasiona su acidez. A estos valores de pH se inhibe la solubilidad de fósforo (P) y disminuye la disponibilidad de calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K), aunque se encuentren en niveles normales en el suelo. Además, reduce la actividad microbiana del suelo, que puede llegar a afectar la nitrificación de la materia orgánica y, por lo tanto, disminuir la cantidad de nitrógeno (N) disponible para las plantas. Estos macronutrientes son de vital importancia en la producción de aguacate, debido a que son los principales formadores de estructuras, componentes de enzimas y nucleoproteínas (Salazar-García 2002).

También se presentan contenidos altos de zinc (Zn) y materia orgánica, y contenidos normales de K, Ca, Cu y boro (B), aunque con bajos contenidos de Mg, azufre (S) y manganeso (Mn). La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es 5,43 Cmol/kg, considerada como baja, lo que indica que el suelo posee una baja capacidad para suministro y reserva de bases. La saturación de Ca y K son altas, mientras que la de Mg es normal. Las relaciones iónicas entre las bases indican que existe una carencia inducida de Mg por el K. El cultivo de aguacate Hass es especialmente sensible a la salinidad del suelo, especialmente a los complejos formados por el sodio (Na) (Dubrovina y



Bautista 2014); sin embargo, debido al pH y a los altos contenidos de materia orgánica, no hay riesgo de salinidad y el contenido de Na es menor a 1 Cmol/kg, por lo que no hay riesgos de sodicidad.

Física del suelo

Se realizó una calicata en el lote, en la que se observó que el horizonte A tiene una profundidad aproximada de 35 cm, presenta un alto contenido de materia orgánica y tiene una textura al tacto francoarenosa (FA), lo que indica una alta porosidad. Profundizando en el perfil, se notó un horizonte de transición A1, en el que se evidenció presencia de materia orgánica procedente del primer perfil, que por el movimiento del agua se va traslocando en profundidad. También hay concentración iluvial de arcillas en profundidad (mayor a 50 cm), lo que disminuye la porosidad, reduciendo la velocidad con la que el agua se mueve en el suelo y ocasionando una mayor retención de humedad (figura 4).

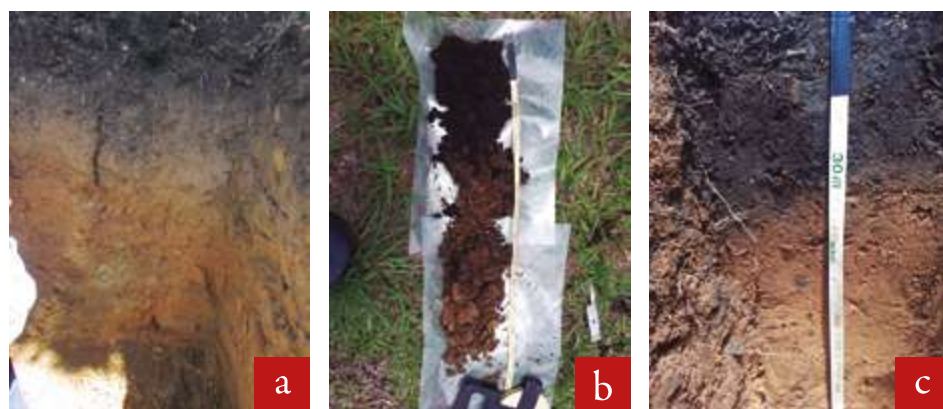


Foto: Diana Dorado

Figura 4. Perfiles de suelo en cada localidad. a. Herveo; b. Rionegro; c. Morales.

De acuerdo con los resultados obtenidos de las muestras tomadas, el suelo donde se encuentra el huerto experimental es de textura FA, en el primer perfil del suelo, y se vuelve más gruesa a medida que se va profundizando. La densidad aparente está entre 0,9 y 1,09 g/cm³, lo que indica que el suelo tiene una alta porosidad y permeabilidad, propiciado por los altos contenidos de materia orgánica. Los valores de porosidad total son superiores al 40 %, considerándose muy alta, lo que favorece la relación aire/agua en la zona de raíces de aguacate Hass (tabla 5).

Tabla 5. Resultados de los análisis físicos, en la finca Los Arrayanes

| Característica física | 0-15 cm | 15-30 cm | 30-45 cm |
|---------------------------------|---------|----------|----------|
| Textura | FA | FA | AF |
| Da (g/cm ³) | 0,93 | 1,03 | 1,09 |
| Dr (g/cm ³) | 2,45 | 2,53 | 2,59 |
| Porosidad total (%) | 62,2 | 59,3 | 58,1 |
| Conductividad hidráulica (cm/h) | 6,64 | 4,69 | 4,93 |

FA= Francoarenoso; AF = Arenoso franco

Fuente: Elaboración propia

Rionegro

Los suelos del oriente antioqueño (altiplano), incluido el municipio de Rionegro, son suelos Andisoles, que evolucionaron a partir de material volcánico, principalmente cenizas y piroclastos, caracterizado por las propiedades ya descritas para este orden de suelos. Los suelos donde se ubica el experimento pertenecen a la Asociación Guadua (GDd1), conformada principalmente por suelos *Typic Hapludands*. Se localiza en el paisaje de altiplanicie, en un tipo de relieve de lomas y colinas disectadas a veces masivas; el relieve es fuertemente ondulado con cimas redondeadas y agudas, pendientes generalmente cortas, convexas y cóncavas en las partes inferiores, entre 7% y 25 %. (IGAC 2007).

Química del suelo

El pH del suelo es clasificado como fuertemente ácido, con un valor de 5,5 en el límite del rango establecido. Valores de pH por debajo de 5,4 aumentan la probabilidad de que el aluminio (Al) forme parte del complejo de intercambio y eleve la saturación de este, haciéndolo más disponible para las plantas, lo que a su vez puede ocasionar toxicidad por este elemento (Casierra-Posada y Aguilar-Avenidaño 2007). El suelo presenta contenidos altos de Fe ocasionando la limitante del pH; también tiene un alto contenido de materia orgánica, lo que le proporciona una mayor estabilidad y mejora la actividad microbiana, así como la presencia de contenidos normales de K, Cu y Zn; contiene niveles bajos de P, ocasionados posiblemente por la capacidad fijadora de la alófana, mineral propio de suelos originados de cenizas volcánicas, sobre



este elemento (Maldonado-Torres et al. 2007). Los niveles de Ca, Mg, S, Mn y B son bajos, característica propia de suelos de este tipo. La CIC es de 2,83 Cmol/kg, considerada muy baja, por lo que se infiere que el suelo tiene muy baja capacidad para suministro y reserva de bases. El porcentaje de saturación de Ca es alto, mientras que el de Mg es medio y el de K es bajo. Las relaciones iónicas entre las bases indican una carencia inducida de Ca. La conductividad eléctrica es de 0,15 dS/m, lo que permite afirmar que no hay problemas de salinidad que —como se mencionó— es una de las principales limitantes del cultivo. En general, este suelo presenta bajos niveles de disponibilidad de nutrientes. En la tabla 8, se relacionan los resultados obtenidos del análisis de suelo del huerto experimental.

Física del suelo

En el perfil realizado (figura 4), se evidenció una capa orgánica en los primeros 20 cm, con una textura al tacto francoarenosa, lo que implica una alta porosidad. Después de los 25 cm se evidencia un perfil de color pardo oscuro, de textura franca, con un poco más de arcilla y menor contenido de materia orgánica, por lo que se puede inferir que, a medida que se profundiza en el perfil del suelo, el contenido de arcilla será mayor, disminuyendo la capacidad de drenaje interno del suelo. De los análisis realizados a las muestras tomadas, se obtuvo en general una textura FA; la densidad aparente fue menor a 0,9 g/cm³ cualidad propia de suelos ándicos. La porosidad total es muy alta, favoreciendo los procesos de drenaje, el movimiento de agua en suelo y una mejor relación aire/agua en la zona de raíces de la planta (tabla 6).

Tabla 6. Resultados de análisis físico de suelos, en la finca La Escondida

| Característica física | 0-15 cm | 15-30 cm | 30-45 cm |
|---------------------------------|---------|----------|----------|
| Textura | FA | FA | FA |
| Da (g/cm ³) | 0,52 | 0,52 | 0,48 |
| Dr (g/cm ³) | 2 | 2,09 | 2,17 |
| Porosidad total (%) | 74,1 | 74,9 | 77,7 |
| Conductividad hidráulica (cm/h) | 0,19 | 0,11 | 0,15 |

Fuente: Elaboración propia

Morales

Al igual que las otras dos zonas, los suelos de localidad de Morales presentan propiedades de suelos ándicos, originados a partir de depósitos de cenizas volcánicas y rocas ígneas. Se ubica dentro del paisaje de altiplanicie en clima templado-húmedo. De acuerdo con el IGAC (2008a), estos suelos se clasifican como *Typic Hapludands*, dentro de las unidades cartográficas Asociación *Typic Hapludands-Humic Pachic Dystrudepts* (AQA) y Asociación *Typic Hapludands-Typic Dystrudepts-Typic Paleudults* (AQC). Estos suelos son profundos, bien drenados, con texturas moderadamente gruesas a moderadamente finas y finas, así como de fuertes a moderadamente ácidos, con alta saturación de Al y con fertilidad natural de baja a moderada.

Química del suelo

El pH del suelo es clasificado como fuertemente ácido, con un valor de 5,33, desfavorable para la actividad microbiana, por lo que la nitrificación de la materia orgánica se ve afectada. La asimilación del P disminuye por formarse combinaciones insolubles de este elemento con el Fe y con el Al. De acuerdo con Casierra-Posada y Aguilar-Avenidaño (2007), con estos valores de pH comienzan a presentarse limitaciones para el desarrollo de plantas por la saturación de Al, que inhibe la absorción de otros nutrientes como el P y las bases como el Mg y Ca. El suelo presenta una concentración de 0,26 Cmol/kg de Al, correspondiente al 6,5 % del Al intercambiable en los primeros 15 cm de profundidad —según Salazar-García (2002), el Al intercambiable por encima de 15 % afecta el rendimiento—.

El contenido de materia orgánica es alto, entre 0 y 30 cm de profundidad del suelo, y normal, de 30 a 45 cm, para las condiciones de la zona, lo que favorece algunas condiciones del suelo como la disminución del riesgo de afectación por Al, ya que este forma complejos no tóxicos con los compuestos húmicos (Casierra-Posada y Aguilar-Avenidaño 2007). Los niveles de elementos menores como Fe y Cu son altos en todo el perfil, y se presentan en general contenidos normales de K y contenidos bajos de los demás nutrientes asociados al análisis. La CIC es de 4,08 Cmol/kg, de 0 a 15 cm, y disminuye hasta 1,13 Cmol/kg, a los 45 cm, considerándose como baja e indicando que el suelo tiene baja capacidad para suministro y reserva de bases. El porcentaje de saturación de K, Ca y Mg es alto. Las relaciones iónicas entre las bases están por debajo de lo normal, lo que indica una carencia de Mg. La conductividad



eléctrica es de 0,33 dS/m, que se encuentra dentro del rango apropiado. El contenido de Na es normal (0,04 Cmol/kg), lo que implica que no hay riesgo de sodicidad. En general, este suelo presenta problemas de solubilidad de nutrientes y exceso de Fe y Al, propios de su tipo. Las acciones correctivas para mejorar tales condiciones incluyen la aplicación de cal para disminuir el nivel de Al y elevar el pH; sin embargo, esta práctica debe ser utilizada de tal forma que el balance de nutrientes para la planta no se altere, debido a que puede ocasionar fluctuaciones inadecuadas de pH (Serna et al. 2012).

Física del suelo

Se realizó una calicata en el huerto (figura 4), encontrando que el primer horizonte (A), con una profundidad de 30 cm, presenta un alto contenido de materia orgánica y textura al tacto FA, lo que implica una buena distribución de poros. En el horizonte B, a una profundidad superior a 35 cm, se observa concentración de arcilla y disminución en el contenido de materia orgánica, que a medida que se profundiza se hace más notorio, y la textura pasa de franca a FA, disminuyendo la capacidad de drenaje interno y movimiento del agua en el suelo.

Los resultados obtenidos mostraron que la textura del suelo va de franca a AF, y la densidad aparente es menor a 0,6 g/cm³, debido principalmente al contenido de materia orgánica. Esta condición permite que la porosidad del suelo sea muy alta, favoreciendo los procesos de drenaje interno y aireación del suelo, garantizando una adecuada relación aire/agua en la zona de raíces de la planta (tabla 7).

Tabla 7. Resultados de análisis físico de suelos. Finca El Recuerdo

| Característica física | 0-15 cm | 15-30 cm | 30-45 cm |
|---------------------------------|---------|----------|----------|
| Textura | F | AF | FA |
| Da (g/cm ³) | 0,61 | 0,38 | 0,35 |
| Dr (g/cm ³) | 2,15 | 2,36 | 2,44 |
| Porosidad total (%) | 79,48 | 77,14 | 71,12 |
| Conductividad hidráulica (cm/h) | 15,44 | 11,28 | 12,22 |

F = Franca; AF = Arenoso franco; FA= Francoarenoso
Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Resultados obtenidos de los análisis químicos de suelos de fincas experimentales

| Característica | Herveo | Morales | Rionegro |
|-------------------------|--------|---------|----------|
| pH | 5,5 | 5,2 | 5,5 |
| Ce (dS/m) | 0,2 | 0,4 | 0,2 |
| MO (%) | 8,5 | 14,8 | 12,5 |
| Al intecam (cmol/kg) | | 3,5 | 1,1 |
| CICE (cmol/kg) | 5,7 | 4,3 | 3,0 |
| K (cmol/kg) | 0,2 | 0,3 | 0,2 |
| Ca (cmol/kg) | 4,4 | 2,4 | 1,5 |
| Mg (cmol/kg) | 1,0 | 1,1 | 0,9 |
| P (mg/kg) | 17,21 | 7,08 | 4,14 |
| Fe (mg/kg) | 87,0 | 105,0 | 171,5 |
| B (mg/kg) | 0,2 | 0,3 | 0,4 |
| Cu (mg/kg) | 2,8 | 4,8 | 1,3 |
| Zn (mg/kg) | 6,3 | 4,5 | 2,2 |
| Da (g/cm ³) | 0,9 | 0,6 | 0,5 |
| Porosidad | 62,2 | 71,7 | 74,1 |
| Kh (cm/h) | 6,6 | 15,4 | 0,2 |
| % arena | 72,0 | 52,0 | 66,0 |
| % arcilla | 2,0 | 10,0 | 6,0 |
| Textura | FA | F | FA |

Fuente: Elaboración propia

Caracterización hidrodinámica del suelo

Comparando las tres localidades, se observa que en Herveo el bulbo de humedecimiento es mayor, lo que se explica por la topografía con pendientes del 60% en este huerto. Sin embargo, se corroboró en campo que la pendiente no distorsiona el perfil de humedecimiento que forma el gotero.



La profundidad efectiva del cultivo (45 cm) se alcanza a los 45 minutos de riego en todas las localidades (tabla 9).

Tabla 9. Resultados de la prueba de bulbo húmedo en las tres zonas.

| Tiempo (min) | Morales | | Herveo | | Rionegro | |
|-----------------|---------|-----------|---------|-----------|----------|-----------|
| | DH (cm) | Prof (cm) | DH (cm) | Prof (cm) | DH (cm) | Prof (cm) |
| 15 | 24,5 | 20 | 24,5 | 20 | 19,1 | 33 |
| 30 | 30,6 | 38 | 30,6 | 30 | 29,6 | 40 |
| 45 | 37,9 | 45 | 41,4 | 45 | 33,7 | 44 |
| 60 | 38,2 | 53 | 43,6 | 60 | 38,5 | 47 |

DH = Diámetro de humedecimiento

Fuente: Elaboración propia

Clima

La temperatura es uno de los principales factores que interfieren en el cambio de fase vegetativa a reproductiva en el cultivo de aguacate (Gandolfo 2008). Autores como Bernal y Díaz (2005) y Cortez et al. (2007) han establecido que temperaturas diurnas entre 25 y 30 °C junto con temperaturas nocturnas entre 15 y 20 °C son adecuadas para que no se afecte la apertura floral, la polinización y el cuajado de frutos. Por una parte, temperaturas superiores a 35 °C pueden afectar severamente la fertilización de la flor y la fructificación, además de ocasionar abscisión de los frutos, mientras que, por otra parte, bajas temperaturas inferiores a 12 °C pueden retardar la sincronía floral (Dixon y Sher 2002; Davenport 1986; Rebolledo y Romero 2011). Sin embargo, Cossio-Vargas et al. (2007) observaron que, a temperaturas inferiores a 10 °C, para las condiciones del Estado de Nayarit (México), no hubo efectos negativos sobre la floración y amarre de frutos.

Las condiciones ideales de humedad relativa para un óptimo prendimiento y cuaje de la flor se encuentran entre el 75% y el 80%. El exceso de humedad relativa puede ocasionar el desarrollo de enfermedades que afectan el follaje, la floración, la polinización y el desarrollo de los frutos, mientras que el déficit de humedad en el ambiente afecta la fecundación, provocando la formación de un menor número de frutos. El rango de precipitaciones anuales adecuadas

para el cultivo de aguacate Hass se encuentra entre los 1.200 y 2.000 mm/año (Bartoli 2008).

Para realizar la caracterización climática histórica, se utilizó información de estaciones meteorológicas con influencia en las zonas de estudio, que se encontraran a una altitud similar y dentro de la misma zona climática. Se tomaron series históricas de 10 años de observaciones, realizando un análisis multianual de las variables climáticas: temperatura, brillo solar, humedad relativa y precipitación. Con las series históricas de las variables *temperatura máxima y mínima, brillo solar y humedad relativa* se calculó la ETo, utilizando el modelo Penman-Motheit en el programa EToCalculator de Raes (2009).

En Herveo, se usó la información de la estación climática El Cedral del Centro Nacional de Investigación del Café (Cenicafé), localizada en el municipio de Pereira, a 2.120 msnm, dentro de la zona de influencia del Nevado del Ruiz —al igual que la zona de estudio—, con ubicación geográfica 4° 42' N latitud y 75° 32' W longitud. Por otra parte, en Morales, se utilizó la información de la estación La Trinidad, también perteneciente a Cenicafé, ubicada en el municipio de Piendamó a 1.671 msnm, ubicada geográficamente a 2° 45' N latitud y 76° 35' W longitud. Finalmente, en Rionegro se tomaron los datos de la serie climática de la estación principal del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), del Centro de Investigación La Selva de Corpoica (Rionegro); este centro se encuentra a 5 km lineales de la finca, con ubicación geográfica a 2.120 msnm, 6° 08' N latitud y 75° 25' W longitud.

Según el análisis de la información climática histórica, la zona donde se desarrolló el experimento en Herveo tiene una temperatura promedio de 15,1 °C, con temperatura máxima de 20,0 °C y temperatura mínima de 10,1 °C. La humedad relativa en promedio es de 88,0%, mientras que el brillo solar presenta una media anual de 2,2 h/d. Con estos registros, la región donde se ubica el huerto se clasifica como bosque muy húmedo premontano (bh-pm), según la clasificación de zonas de vida de Holdridge et al. (1971).

En Rionegro, la temperatura media es de 17,1 °C, la máxima es de 22,0 °C y la mínima, de 12,0 °C. La humedad relativa presenta un promedio anual de 76,9% y el brillo solar, un promedio anual de 5,0 h/d. Con la información obtenida, la zona donde se encuentra establecida la parcela de estudio se



clasifica como bh-pm, según la clasificación de zonas de vida de Holdridge et al. (1971).

Para Morales, la temperatura media es de 19,0 °C, la máxima es de 24,3 °C y la mínima, de 15,0 °C. La humedad relativa se encuentra en un rango entre 74% y 84%, con un promedio anual de 80,2%. El brillo solar se encuentra entre 3,1 y 5,1 h/d, y el promedio anual es de 4,1 h/d. Al igual que las demás zonas, esta se clasifica como bh-pm. En la tabla 10, se muestran las características climáticas de las zonas de estudio.

Tabla 10. Características climáticas históricas de las tres zonas de estudio

| Características | Herveo | Morales | Rionegro |
|------------------------------|---------|---------|----------|
| Temperatura media (°C) | 15,1 | 19,0 | 17,2 |
| Temperatura máxima (°C) | 20,1 | 24,2 | 22,9 |
| Temperatura mínima (°C) | 11,2 | 15,0 | 12,3 |
| Humedad relativa (%) | 88,0 | 80,2 | 76,3 |
| Brillo solar (h/d) | 2,2 | 4,1 | 5,0 |
| Precipitación media (mm/año) | 2.908,8 | 2.322,8 | 2.013,7 |
| Evaporación media (mm/año) | 851,1 | 1149,2 | 1210,3 |

Fuente: Elaboración propia

Las tres zonas presentan regímenes de lluvia adecuados para el cultivo de aguacate Hass, ya que las precipitaciones medias anuales se encuentran entre los 1.200 y los 2.000 mm/año, rango establecido como adecuado para la variedad (Bartoli 2008); sin embargo, las lluvias no se distribuyen uniformemente, presentándose meses con déficit hídrico, donde el cultivo necesita riego. Según el balance hídrico multianual, se presenta déficit hídrico en los meses de julio, agosto y septiembre, para Herveo; diciembre, enero, febrero, para Rionegro, y junio, julio, agosto y septiembre, para Morales (figura 5).

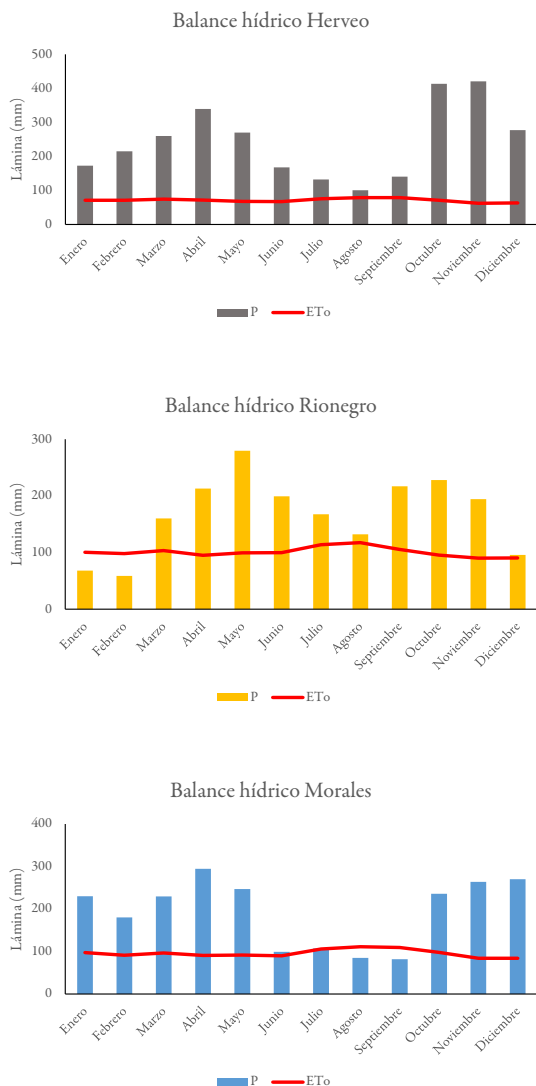


Figura 5. Balance hídrico multianual en las zonas de estudio.

Fuente: Elaboración propia

Para conocer el comportamiento del clima durante la realización del experimento en cada zona de estudio, se instaló una estación climática (EMA) WatchDog serie 2000, Modelo 2450, que registra las variables *temperatura*, *humedad relativa*, *radiación* y *precipitación*, y un registrador de velocidad de viento WindLog (RainWise Inc.).



El comportamiento de la temperatura en Herveo, registrado por la EMA, fue en promedio 17 °C; la temperatura máxima fue de 22 °C y la mínima, de 14 °C; la humedad relativa en promedio fue 76 %. En Rionegro, la temperatura media fue de 17,1 °C, la máxima, de 24,7 °C y la mínima, de 12,3 °C; la humedad en promedio durante el período evaluado fue del 80 %. En Morales, se registró una temperatura promedio durante el período evaluado de 19,6 °C; la temperatura máxima fue de 25,3 °C y la mínima, de 15,5 °C; la humedad relativa en promedio para esta región fue del 79,6 %, disminuyendo en los meses donde se presentaron las más altas temperaturas (figura 6).

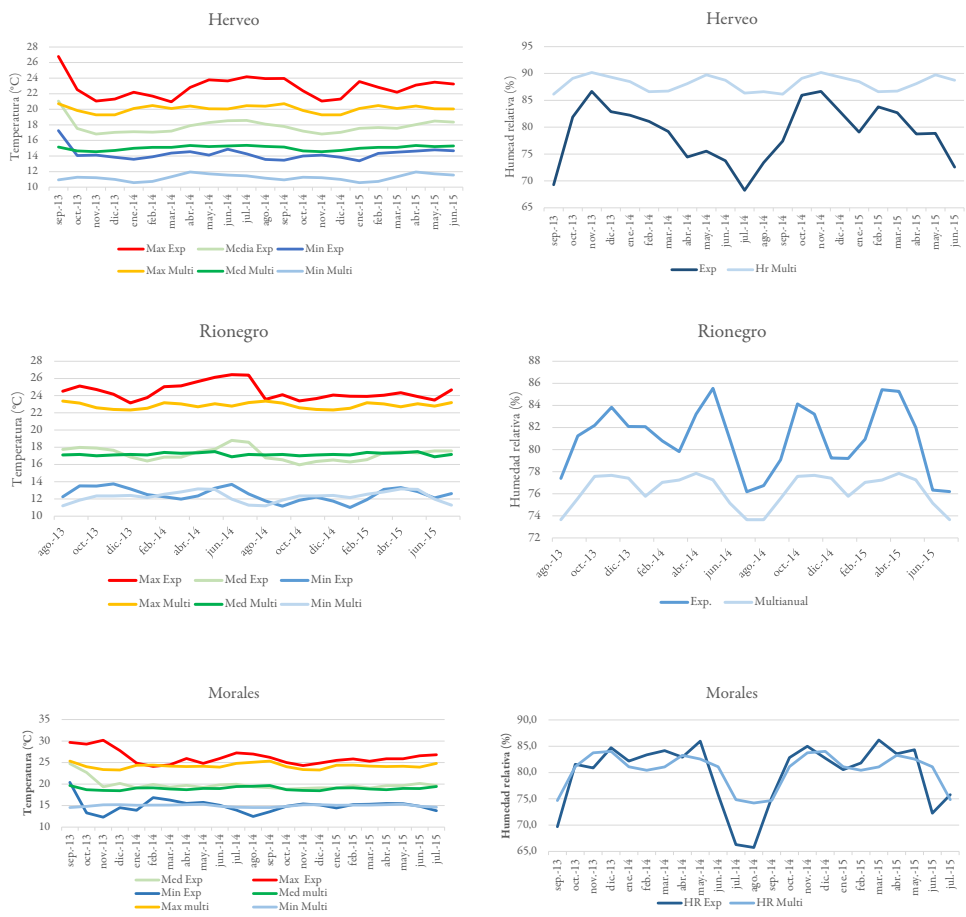


Figura 6. Comparación de variables climáticas (temperatura y humedad relativa) obtenidas en el análisis multianual y las registradas por las estaciones en los huertos experimentales de las tres localidades
Fuente: Elaboración propia

La velocidad del viento en Rionegro y Herveo no supera el rango de vientos suaves a moderados (3 m/s), según Allen et al. (1998). Sin embargo, en Morales se presentaron vientos por encima de 6 m/s, considerados como vientos fuertes (figura 7), influyendo en la caída de flores y frutos, de acuerdo a lo observado en la finca experimental y las fincas aledañas. Esto coincide con lo reportado por Bartoli (2008), quien afirma que el cultivo de aguacate Hass es susceptible a vientos fuertes, porque inhiben la polinización y la fructificación, causando fuertes daños y caída de ramas, flores y frutos.

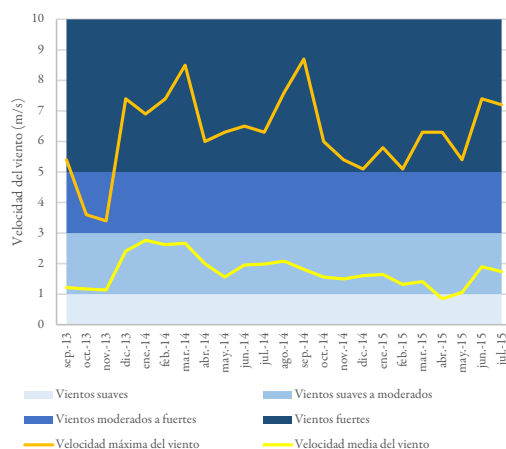


Figura 7. Comportamiento de la velocidad del viento en el municipio de Morales (Cauca).
Fuente: Elaboración propia

Balance hídrico climático y cálculo de láminas de riego

El comportamiento del régimen hídrico en el año 2014 fue similar al multianual, con dominancia de un balance hídrico positivo en las tres zonas de estudio; en el 2015, por efectos del fenómeno de El Niño —que se presentó en el país desde el trimestre febrero-marzo-abril de 2015, hasta llegar a su máximo en diciembre de 2015 (Ideam 2015b)—, se observa una disminución de la precipitación y periodos de déficit más asentados en las tres zonas de estudio, siendo preciso aplicar una lámina mayor para suplir las necesidades del cultivo y evitar un estrés en la planta y que sus procesos fisiológicos se vean afectados (figura 8).

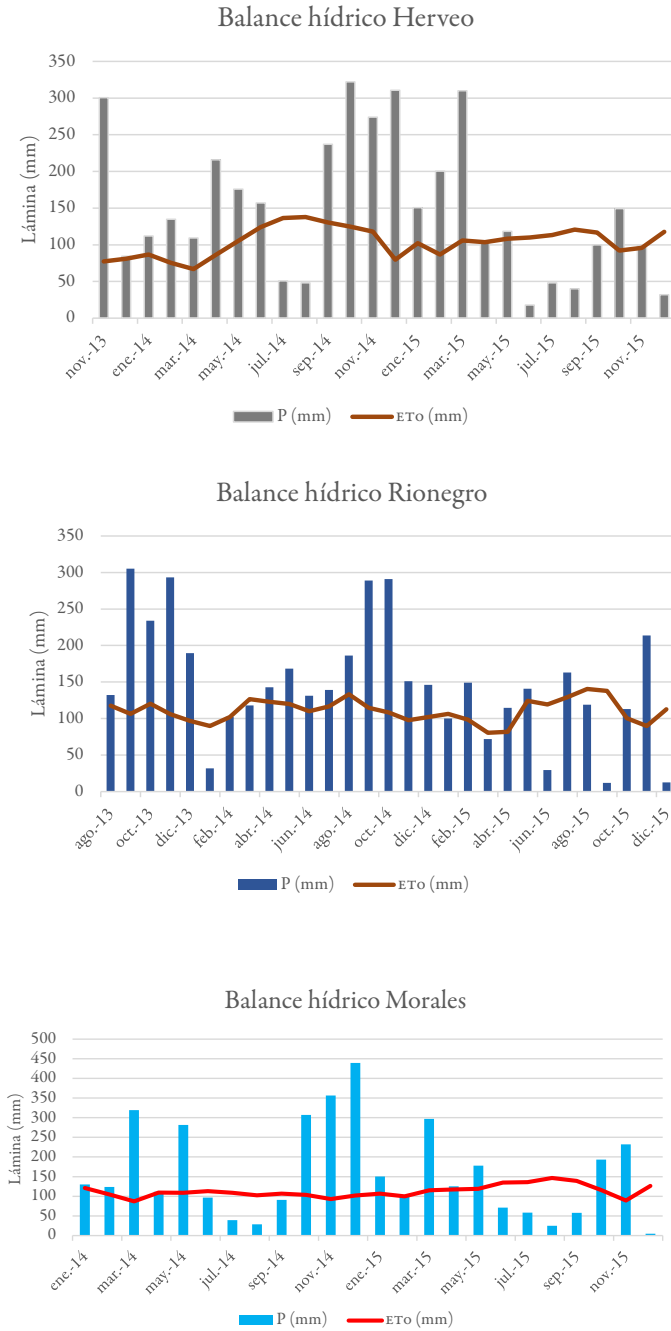


Figura 8. Balance hídrico mensual en las tres localidades durante el desarrollo del experimento.
Fuente: Elaboración propia

El cultivo en las tres zonas se desarrolla sin un sistema de riego o algún mecanismo que permita el aporte adicional de agua a las plantas, por lo que durante los períodos secos, que a su vez coinciden con las etapas fenológicas de floración y cuajado de fruto, se debe garantizar que haya suficiente humedad en el suelo para evitar que la planta se estrese. De acuerdo con Cossio-Vargas et al. (2007), el éxito del cultivo de aguacate en la zona de Tepic (México), donde se cultiva sin riego, se debe al material del subsuelo llamado “Xal”, que retiene suficiente humedad, siendo esta suministrada en la época seca a la capa de suelo superficial. Pero en las zonas donde se desarrolla la investigación (Herveo-Rionegro-Morales) los suelos son de origen volcánico, por lo que retienen buena humedad y poseen una alta velocidad de infiltración, lo que permite que en épocas de bajas precipitaciones el agua en el suelo drene rápidamente y se requiera suministrar riego para mantener la disponibilidad de agua a la planta.

La cantidad de agua expresada en lámina y volumen aplicada por tratamiento, localidad y ciclo productivo se presenta en la tabla 11. Para la localidad de Herveo no se muestra la información de 2015, debido a que el productor realizó la cosecha dos meses después de que el fruto alcanzara la madurez fisiológica para el ciclo de 2014, afectando el desarrollo normal de la floración y provocando un retraso significativo para el nuevo ciclo; por esta razón, los árboles emitieron nuevos brotes vegetativos y no reproductivos.




Tabla 11. Láminas de riego y volumen aplicado por árbol para los ciclos 2014 y 2015 en las tres localidades

| Tratamientos | Ciclo 2014 | | | Ciclo 2015 | | |
|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|
| | T1 (0,5 ETo) | T2 (0,75 ETo) | T3 (1,0 ETo) | T1 (0,5 ETo) | T2 (0,75 ETo) | T3 (1,0 ETo) |
| Herveo | | | | | | |
| Lámina (mm) | 161,6 | 249,7 | 317,8 | | | |
| Volumen (L) | 646,4 | 998,7 | 1271,2 | | | |
| Rionegro | | | | | | |
| Lámina (mm) | 55,1 | 144,0 | 243,9 | 214,6 | 341,2 | 515,4 |
| Volumen (L) | 220,3 | 575,9 | 975,5 | 858,3 | 1.365 | 2.061,7 |
| Morales | | | | | | |
| Lámina (mm) | 146,3 | 204,8 | 333,5 | 284,4 | 500,1 | 796,9 |
| Volumen (L) | 585,2 | 819,2 | 1.333,9 | 1.137,7 | 2.000,6 | 3.187,7 |

Nota: Volúmenes de agua aplicados por árbol para un ciclo productivo de nueve meses.

Fuente: Elaboración propia

En Herveo (Tolima) se presentó una precipitación acumulada anual en el año 2014 de 2.147,7 mm, y la ETo, de 1.072,4 mm. Los meses donde fue necesario aplicar riego en esta localidad fueron enero, marzo, junio, julio y agosto. En el municipio de Morales, la precipitación acumulada anual en 2014 fue de 2.323,7 mm y la ETo, de 1.260,0 mm, es decir, que al igual que en Herveo el balance hídrico es positivo; sin embargo, se evidencia que la demanda evaporativa es mayor en Morales, lo que a su vez permite inferir que las láminas de riego a aplicar pueden ser ligeramente más altas en esta zona (figura 9). El volumen más alto en el año 2014 se aplicó en el mes de julio con 238, 350 y 558 L/mes para los tratamientos L1, L2 y L3 respectivamente. En el 2015, la precipitación acumulada fue 1497 mm y la ETo fue 1447 mm; se evidencia una disminución en la precipitación y un aumento en la ETo con respecto al análisis multianual, por tanto, aumenta la demanda hídrica atmosférica y el número de eventos de riego (tabla 11). Fue necesario regar la mayor parte del tiempo con excepción de noviembre; el mes donde se aplicó el volumen más alto fue agosto, con 261, 429 y 609 L/mes para los tratamientos L1, L2 y L3, respectivamente (figura 9).

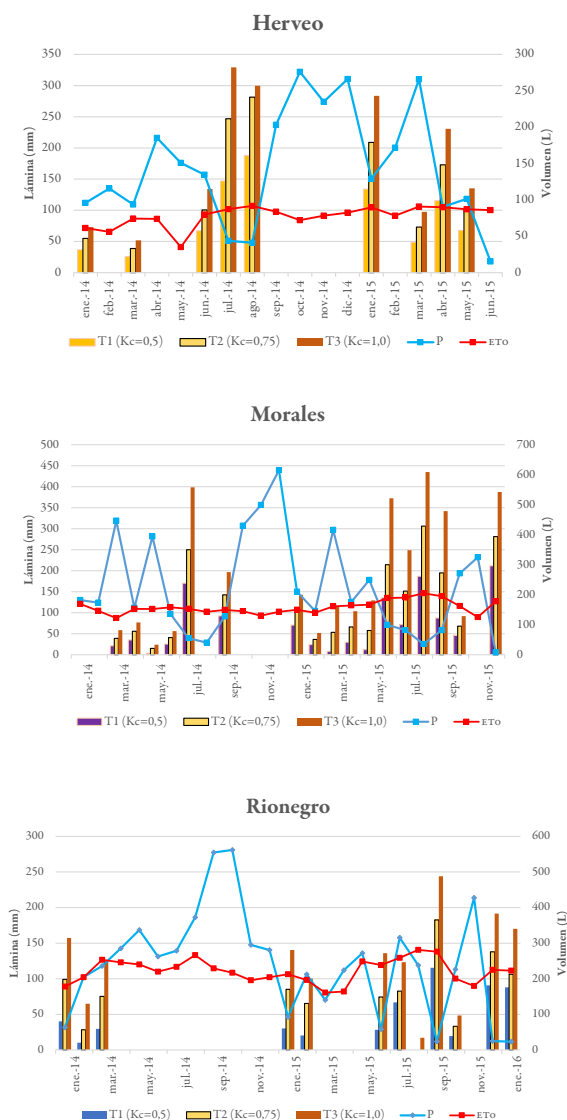


Figura 9. Momentos de aplicación de riego para cada zona de estudio
Fuente: Elaboración propia

En Rionegro se registró una precipitación acumulada anual en el 2014 de 1.896,8 mm y la ETO fue de 1.344,5 mm. Se observa que el acumulado en precipitación anual en Rionegro es menor al de Herveo y Morales; sin embargo, el volumen de riego aplicado es menor (tabla 11), debido a que la precipitación tiene una distribución más uniforme. En 2014, solo fue



necesario aplicar riego en los meses de enero, febrero y marzo. En 2015, la precipitación y ETo acumulados fueron 1.230 y 1.321 mm respectivamente, presentando un balance hídrico negativo, por tanto, la lámina de riego aumentó considerablemente y se regó durante la mayor parte del año, siendo septiembre el mes más crítico, al aplicar una lámina de 231, 366 y 488 L/mes para los tratamientos L1, L2 y L3, respectivamente (figura 9).

Como se puede observar, las tres zonas presentan regímenes de lluvia adecuados para el cultivo de aguacate Hass, ya que las precipitaciones medias anuales se encuentran entre los 1.200 y los 2.000 mm/año, rango establecido como adecuado para la variedad (Bartoli 2008). Sin embargo, el régimen hídrico en las zonas es bimodal, por lo que durante una época del año hay un período seco bajo condiciones de comportamiento normal del clima. También se observó cómo las zonas se vieron afectadas por el fenómeno de El Niño del 2015, donde fue indispensable contar con un sistema de riego y una metodología clara para la aplicación de las láminas. Si los agricultores de aguacate empiezan a implementar estas metodologías, podrán hacer sus sistemas más eficientes y resilientes al cambio climático.

Comportamiento de la humedad del suelo

Con los sensores de humedad de suelo instalados, se realiza el seguimiento al comportamiento de la humedad a distintas profundidades (15 cm, 30 cm y 45 cm), en todos los tratamientos de riego y el testigo, debido a que se está regando con base a demanda hídrica atmosférica y no al almacenamiento de humedad en el suelo. El comportamiento de la humedad coincide con el balance hídrico: cuando se presenta déficit hídrico, la humedad disminuye; cuando la precipitación excede a la demanda hídrica atmosférica, la humedad aumenta y se mantiene por encima de capacidad de campo. Aunque los sensores se encuentran instalados en campo en un mismo bloque y en árboles continuos, debido a la variabilidad del suelo cambia la curva de retención entre un punto y otro, por lo tanto, hay diferencias entre los tratamientos aplicados. En las tres localidades, independientemente de la variabilidad del suelo, la humedad del testigo es siempre menor en comparación con los tratamientos de riego.

En la figura 10, se muestra la diferencia en el contenido de humedad del suelo entre un tratamiento de riego y el testigo para el mes de agosto de 2015,

asociado a la curva de retención en la localidad de Morales. La curva de retención de humedad para este suelo arrojó que la humedad volumétrica a una tensión de 0,0 bar —punto conocido como saturación— es de 55,3 %; a 0,3 bar, indicando capacidad de campo (CC), es 44,68 %, y a 15,0 bar, punto de marchitez permanente (PMP), es 40,0 %. La condición ideal para el cultivo es que la humedad del suelo se encuentre entre CC y PMP (franja de color guayaba en la figura 10). La humedad del suelo en el tratamiento con riego se mantiene cerca de CC, donde la planta puede tomar el agua a una tensión de 0,3 bar, mientras que en los árboles testigos la humedad se encuentra por debajo de 20 %, demasiado baja, pues la planta tiene que hacer mucho esfuerzo para tomar el agua; en campo se observa que los frutos en el testigo perdieron turgencia en comparación con los tratamientos de riego.

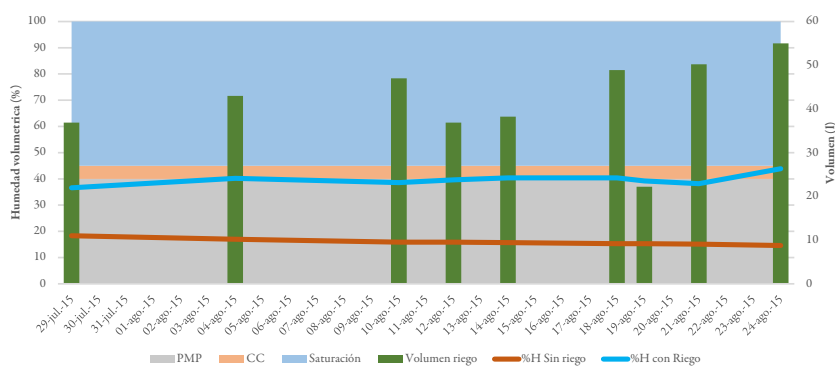


Figura 10. Comportamiento de la humedad del suelo con riego y testigo en la localidad Morales (Cauca). Fuente: Elaboración propia

Según Bower (1988), cuando el agua es insuficiente, así el desarrollo del fruto esté avanzado, una situación de estrés excesivo durante esta época puede afectar la calidad de fruto, además de aumentar la caída de frutos; cuando los frutos se encuentran en su primera etapa de desarrollo —débilmente sostenidos al árbol—, estos pueden perderse bajo condiciones de estrés. Por otra parte, el aporte hídrico garantiza buen tamaño de fruta (Lahav y Kalmar 1983).

Variables fisiológicas

Los factores climáticos influyen en la demanda de la atmósfera por evaporación y son responsables de las variaciones en el uso del agua durante la temporada de crecimiento. La disponibilidad hídrica, conjugada con otras



variables climáticas, determina los ciclos productivos, lo que afecta los ciclos fisiológicos (Avilán et al. 2007).

Abscisión de flores y frutos

En la finca seleccionada de cada municipio, debajo del dosel de los árboles se ubicó una polisombra, con el fin de recolectar semanalmente las estructuras vegetativas y reproductivas que caen del árbol. En el laboratorio, del material recolectado se seleccionaron tres alícuotas para hacer el conteo del número de flores/frutos, así como sus respectivos pesos frescos y secos. En las tres localidades, se encontró que el patrón de comportamiento de la abscisión de flores y de frutos muestra diferencias a través del tiempo (figura 11).

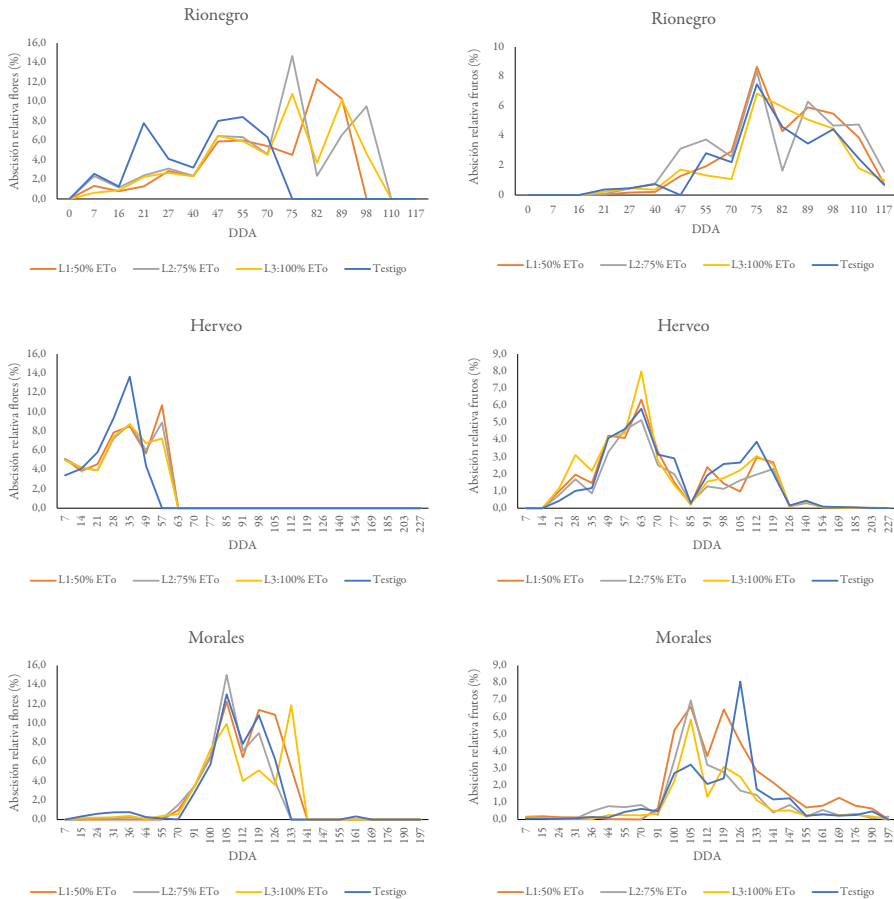


Figura 11. Abscisión de flores y frutos en las tres zonas de estudio.

Fuente: Elaboración propia

Para la localidad de Rionegro, se observa que el comportamiento de la abscisión de flores es similar entre los tratamientos de riego; además, se presenta un pico máximo de caída de estructuras florales a los 75 días después de anthesis (DDA), diferenciándose en la magnitud, y con una duración aproximada de 35 días. Por otra parte, en el testigo se observan dos picos: uno a los 21 y otro a los 55 DDA, siendo más prolongados, con una duración de 75 días. El pico máximo de abscisión para los tratamientos de riego y testigo se presenta a los 75 DDA, cuando el fruto tiene un diámetro promedio de 10,1 mm.

En Herveo, la abscisión relativa de flores tuvo un comportamiento similar en los árboles con tratamientos de riego, con un máximo a los 57 DDA. El testigo, por su parte, presenta un pico adelantado a los 35 DDA y una magnitud mayor a los tratamientos de riego, indicando una temprana y elevada abscisión de flores; este comportamiento es análogo al que se presenta en Rionegro. La abscisión de frutos es similar entre los tratamientos de riego y el testigo, presentándose dos picos a los 63 y 112 DDA, cuando el fruto tiene un diámetro de 10,2 y 25,2 mm, respectivamente.

Para el caso de Morales, se observó que la abscisión de los tratamientos L1 y L3 es más prolongada, presentando dos picos a los 105 y 130 DDA, respectivamente. En la abscisión relativa de frutos se observa que el testigo tiene una magnitud mayor que los demás tratamientos. Los picos de abscisión se presentan a los 105 y 126 DDA, con diámetros de 4,1 y 4,6 mm, respectivamente.

En Rionegro, la mayor caída de flores se presenta con el tratamiento L2, con picos máximos a los 7 y 47 DDA, alcanzando hasta 30.000 estructuras caídas. El testigo y el tratamiento L3 presentaron menos número de flores caídas. El pico máximo de caída de frutos fue a los 75 DDA, pero la magnitud fue diferente entre los tratamientos, siendo mayor en L1 y L2 (figura 12).

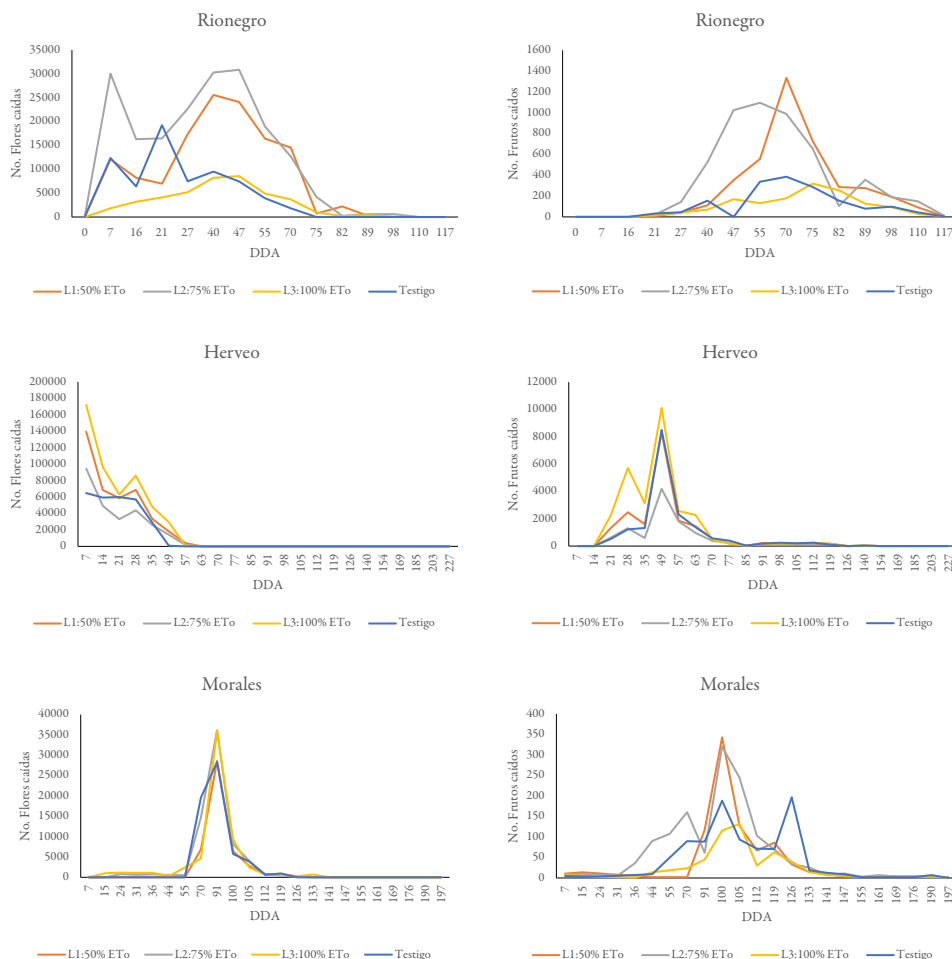


Figura 12. Número de estructuras caídas en las tres zonas de estudio

Fuente: Elaboración propia

En Herveo, la caída de flores y frutos tuvo un comportamiento similar entre tratamientos, pero de diferente magnitud, siendo mayor en L3 y más baja en L2. La caída de flores presentó dos picos a los 7 y 28 DDA, alcanzando a los 7 DDA con L3 las 172.032 flores. El número de frutos también presentó dos picos: a los 28 y a los 40 DDA, con una diferencia de 6.000 frutos caídos entre los tratamientos L3 y L2. Debido a que el tratamiento L2, correspondiente a aplicar 75 % ETO, presenta una menor caída de estructuras reproductivas, se esperaba que su potencial productivo fuera mayor, lo que se corroboró en los

resultados de producción donde los árboles a los que se les aplicó el 75 % ETO presentaron los rendimientos más altos (figura 12).

En Morales, la caída de flores solo presentó un pico a los 91 DDA, con un comportamiento similar entre tratamientos y el testigo. El número de frutos caídos es similar para L1 y L2, mientras que para L3 es de baja magnitud. El testigo tiene una magnitud más baja, pero más prolongada que en los demás tratamientos de riego (figura 12).

Satisfacer las necesidades hídricas del cultivo en las diferentes etapas de desarrollo es de vital importancia. Según Whiley et al. (1988), los requerimientos de agua aumentan sustancialmente durante la floración, reflejando el incremento en el área susceptible a perder agua, ya que existe una pérdida preferencial de agua respecto a los órganos reproductores. El manejo del agua en el huerto durante la floración es crucial para la formación de fruto, en especial si los árboles están plantados en suelos con poca retención de agua.

Crecimiento del fruto

En las tres localidades, el diámetro del fruto muestra un crecimiento continuo desde el periodo de anthesis, hasta alcanzar su madurez fisiológica, presentando un crecimiento sigmoide, en donde se distinguen tres fases: la fase inicial corresponde a un crecimiento lineal; en la segunda fase, el crecimiento es exponencial y, por último, en la fase de maduración el fruto continúa aumentando su diámetro, pero a una tasa progresivamente menor (figura 13).

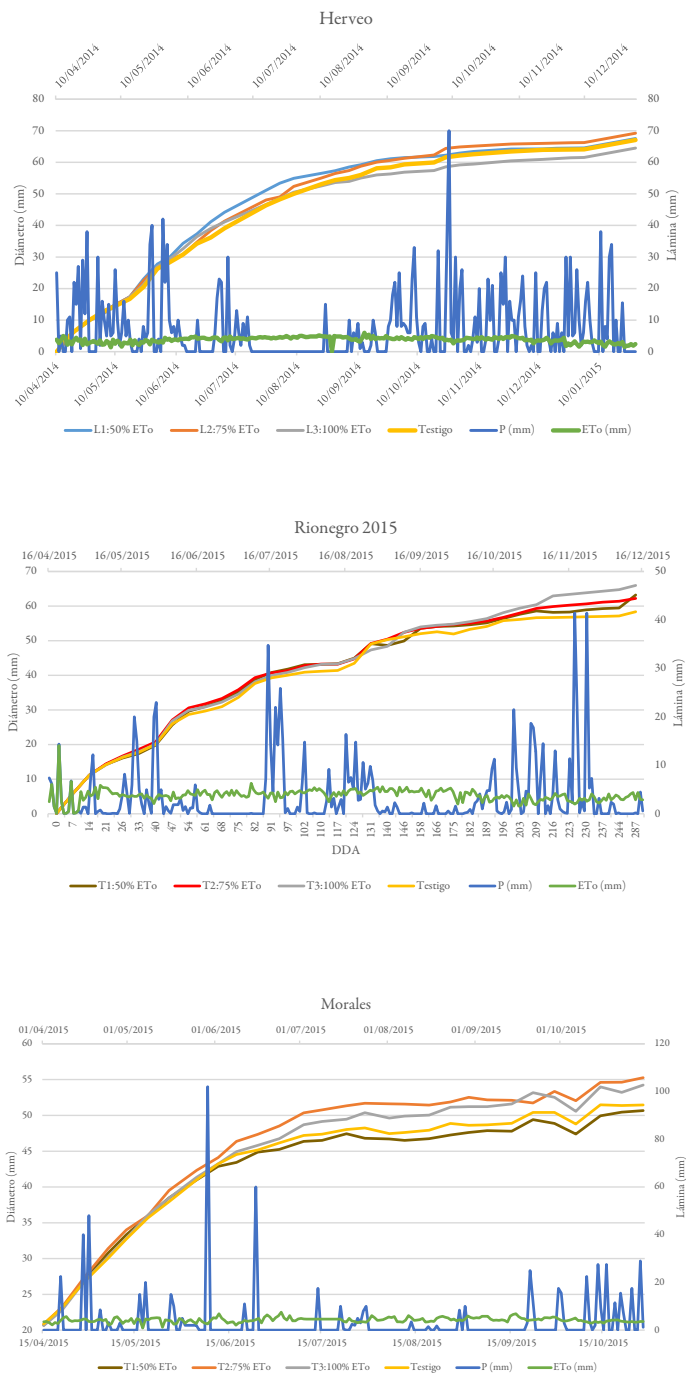


Figura 13. Crecimiento del fruto en las zonas de estudio.

Fuente: Elaboración propia

En Herveo, la fase inicial empezó desde los 0 hasta los 37 días, alcanzando un diámetro promedio de 15,2 mm, sin presentar diferencias entre tratamientos, y con un balance hídrico positivo. La fase de crecimiento, la exponencial, empezó a partir del día 37 hasta los 134 DDA, con un balance hídrico negativo, en el que se observa un efecto de los tratamientos sobre la variable respuesta; con la lámina de 50 % ETO, se tienen frutos de mayor diámetro (56,5 mm), en comparación al testigo (53,0 mm). Finalmente, la fase de maduración se presentó desde los 134 días hasta los 293 DDA; con la lámina de 75 % ETO se obtiene un mayor diámetro (69,2 mm).

En Rionegro, la fase lineal se extendió hasta los 26 días, hasta alcanzar los 16,0 mm, sin diferencias entre tratamientos, y con un balance hídrico positivo. El crecimiento exponencial se dio a partir de los 26 días hasta los 146 DDA, presentándose un comportamiento similar entre tratamientos, con un diámetro promedio de 51,5 mm y un balance hídrico positivo. En la fase de maduración, hasta los 287 DDA y con la lámina de 100 % ETO, hay una mejor respuesta en diámetro (65,0 mm), en comparación con el testigo (57,0 mm).

En Morales, la fase de crecimiento lineal fue hasta los 28 días, alcanzando un diámetro promedio de 22,5 mm, sin observar diferencias entre tratamientos —al igual que Herveo y Rionegro el balance hídrico fue positivo—. El crecimiento exponencial empezó de los 28 hasta los 85 DDA, obteniendo un diámetro mayor con la lámina de 75 % ETO. En la fase de maduración, donde se presentó un balance hídrico negativo, se vio más acentuada la diferencia entre el diámetro obtenido con las láminas de mayor aplicación, en comparación con el testigo y láminas de menor aplicación, obteniendo diámetros de 54,2, 55,3, 50,7 y 51,0 mm para 100 %, 75 %, 50 % ETO y el testigo. La fase de maduración se dio de los 85 hasta los 224 DDA.

Producción

En las cosechas, se dispusieron canastas etiquetadas con el tratamiento al que correspondía cada árbol, se contó el total de frutos cosechados y se registró su peso. Para comparar la influencia del riego en la producción de aguacate Hass, estadísticamente se utilizó el paquete SAS y se realizaron análisis de varianza y pruebas de medias (Duncan $p \leq 0,05$).



En Herveo, con el testigo —que solo recibe como aporte hídrico el agua de lluvia— se obtuvo un rendimiento de 13,4 t/ha, mientras que aplicando una lámina de riego del 75 % ETo el rendimiento fue de 19,2 t/ha, produciendo aproximadamente 5,75 toneladas más (tabla 12). En general, con los tres tratamientos de riego aplicados, se obtuvieron rendimientos más altos en comparación con el testigo, con diferencias significativas. De acuerdo a lo reportado en Agronet (2014), los productores de Tolima en el 2014 tuvieron un rendimiento promedio de 8,2 t/ha, mientras que en cultivos tecnificados se obtienen rendimientos de hasta 17 t/ha. Los rendimientos obtenidos en esta investigación son más altos que el promedio regional, e incluso se alcanza a superar los 17 t/ha. Salazar-García (2002) reporta un rendimiento potencial de 32,5 t/ha, pero en condiciones edafoclimáticas diferentes a las nuestras.

Tabla 12. Efecto de tratamiento de riego en el rendimiento del cultivo de aguacate Hass en las tres zonas de estudio, utilizando la prueba Duncan

| Localidad | Tratamiento | Línea Base 2013 | Ciclo 2014 | Ciclo 2015 |
|-----------|----------------|--------------------|--------------------|------------|
| | | Rendimiento (t/ha) | | |
| Rionegro | 50 % ETo (L1) | 12,8 | 8,8 b ¹ | 4,6 c |
| | 75 % ETo (L2) | | 15,4 a | 7,8 a |
| | 100 % ETo (L3) | | 11,1 ab | 6,8 ab |
| | Testigo | | 14,6 a | 5,3 bc |
| Morales | 50 % ETo (L1) | 7,6 | 1,3 d | 19,5 a |
| | 75 % ETo (L2) | | 7,7 a | 19,1 a |
| | 100 % ETo (L3) | | 6,0 b | 28,6 a |
| | Testigo | | 4,1 c | 17,6 a |
| Herveo | 50 % ETo (L1) | 7,5 | 16,9 c | |
| | 75 % ETo (L2) | | 19,2 a | |
| | 100 % ETo (L3) | | 17,8 b | |
| | Testigo | | 13,4 d | |

¹ Números con la misma letra entre columnas no difieren estadísticamente ($p < 0,05$), de acuerdo a la prueba de separación de medias de Duncan.

Fuente: Elaboración propia

En Morales, es importante resaltar que las limitantes más importantes para que el cultivo no expresara todo su potencial productivo en el ciclo de 2014 fueron los eventos climáticos —aumento de la velocidad del viento y granizadas— que se presentaron en la etapa de floración, con lo que se vieron afectadas las estructuras reproductivas y vegetativas. El rendimiento para los productores del Cauca en el año 2014 se encontró en 6,6 t/ha (Agronet 2014); solo con la lámina de 75 % ETo se alcanzó a superar el promedio de la zona con 7,7 t/ha, a pesar de los eventos climáticos que se presentaron. En el ciclo de 2015, el mejor rendimiento se obtuvo aplicando una lámina de 100 % ETo (28,6 t/ha), produciendo 11 t más que el testigo (tabla 12) y superando ampliamente el promedio regional.

En Rionegro, el rendimiento más alto en los ciclos 2014 y 2015 se obtuvo con la lámina de 75 % ETo, presentando diferencias significativas en comparación con aplicaciones del 50 % y 100 % ETo. El rendimiento promedio para esta zona fue de 9,9 t/ha, superado por todos los tratamientos, con excepción de la lámina 50 % ETo en el ciclo 2014. Para las localidades de Herveo y Rionegro, aplicando una lámina de 75 % ETo, se encuentran los rendimientos más altos (tabla 12).

Las láminas aplicadas en los tratamientos de riego del experimento se calculan con base en el porcentaje de la ETo, buscando aproximarse al Kc. Con los resultados de crecimiento del fruto y rendimiento de las tres localidades, donde los mejores comportamientos se presentan cuando se aplica una lámina de 75 % ETo, se sugiere que el cultivo de aguacate Hass tiene su mejor respuesta productiva con un Kc de 0,75. Este coeficiente es similar al encontrado por Ferreyra et al. (2007) en Aconcagua, quienes reportaron que los mayores rendimientos se obtienen con un Kc de 0,72.

Indicadores de uso eficiente del agua

Para determinar si el aporte de agua mediante riego suple las necesidades de los cultivos, se han desarrollado diversas metodologías. Una de las primeras aproximaciones realizadas fue el uso de índices de eficiencia para evaluar el manejo del riego y la productividad derivada de este (Wolters y Bos 1990; Smith 2000). Desde entonces, se han empleado algunos indicadores de gestión que cuentan con distintos parámetros que permiten medir la eficiencia del riego (Pérez et al. 2009).



Diversos autores han sugerido distintas clasificaciones para los indicadores. De este modo, los indicadores utilizados para relacionar la aplicación de agua con los requerimientos del cultivo se han agrupado en una categoría llamada *indicadores de adecuación* (Gorantiwar y Smouth 2005). Este tipo de indicadores miden la capacidad de un sistema para aportar la cantidad de agua necesaria para satisfacer las demandas de riego (Oad y Sampath 1995). El intento de ajustar la demanda del agricultor a los requerimientos reales de los cultivos supondría un uso más racional del agua, aplicándola solo cuando sea necesaria, sin ocasionar reducciones en la productividad de los cultivos, mejorando de esta forma la economía del agricultor.

Indicador de eficiencia en el uso del agua o productividad del agua

La productividad del agua (WUE , por sus siglas en inglés) o la eficiencia en el uso del agua (EUA) se define como la relación entre los beneficios netos de los cultivos o cualquier otro sistema de producción y la cantidad de agua utilizada para producir esos beneficios. En un sentido más amplio, este indicador refleja el enfoque actual de la producción agrícola, donde se requiere mayor producción de alimentos, con una menor cantidad de agua consumida por unidad productiva (Molden et al. 2010).

Este parámetro es ampliamente utilizado en las investigaciones referentes al manejo eficiente del agua, en diferentes cultivos de importancia comercial a nivel mundial. Silva et al. (2009), García-Tejero et al. (2010), Panigrahi et al. (2012) y Pascual et al. (2016) determinaron este indicador para medir la eficiencia en el uso del agua de distintos regímenes de riego, sobre la productividad del cultivo en durazno, cítricos y mango. En Colombia, el indicador EUA ha sido utilizado para definir la mejor lámina de riego en función del rendimiento en cultivos de cilantro (Marín-Pimentel 2010), rosas (Arévalo-Hernández 2011) y maracuyá (Dorado et al. 2013).

Perry et al. (2009) reportan que este indicador permite entender mejor cómo distintos escenarios agroclimáticos y prácticas de manejo pueden influir en la relación entre la producción agrícola y el consumo de agua, definiendo así la EUA de un cultivo como la relación entre la cantidad de producción de biomasa y la cantidad de agua consumida para obtener dicha producción. Para el caso de este estudio, la biomasa son los frutos cosechados, en términos de producción (kg/árbol) al final del ciclo productivo. La medición se realizó

al final del ciclo, obteniendo los datos de cosecha, y se relacionó la producción y la cantidad de agua consumida durante todo el ciclo por cada tratamiento. Siguiendo la metodología propuesta por Perry et al. (2009), la expresión con la que se definió este indicador es:

$$EUA = \frac{\text{Producción (kg/árbol)}}{\text{mm de agua aplicada por tratamiento}}$$

De acuerdo con lo anterior, se calculó el indicador eua para los tres tratamientos de riego establecidos (T1: 0,5 ETO; T2: 0,75 ETO; T3: 1,0 ETO) y el testigo (T4), utilizando para T4 la cantidad de agua aportada por la precipitación. En las tablas 13, 14 y 15, se muestran los resultados obtenidos para las tres localidades, en cuanto al comportamiento del indicador respecto a la producción y la lámina aplicada por árbol.

Tabla 13. Uso eficiente del agua en Herveo, Tolima

| Tratamiento | Herveo | | | |
|----------------------------|--------|-------|-------|---------|
| | T1 | T2 | T3 | T4 |
| Producción (kg/árbol) | 137,6 | 156 | 145 | 108,6 |
| Lámina aplicada (mm/árbol) | 116,8 | 190,7 | 244,6 | 1.523,9 |
| EUA (kg/árbol/mm) | 2,39 | 2,08 | 1,24 | 0,71 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Uso eficiente del agua en Morales, Cauca

| Tratamiento | Morales | | | |
|-------------------------|---------|--------|-------|---------|
| | T1 | T2 | T3 | T4 |
| Producción (kg/árbol) | 78,7 | 76,9 | 86,9 | 61,9 |
| Lámina árbol (mm/árbol) | 213,6 | 391,12 | 276,3 | 2.078,8 |
| EUA (kg/árbol/mm) | 0,37 | 0,2 | 0,3 | 0,03 |

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 15.** Uso eficiente del agua en Rionegro, Antioquia

| Tratamiento | Rionegro | | | |
|-------------------------|----------|-------|---------|---------|
| | T1 | T2 | T3 | T4 |
| Producción (kg/árbol) | 30,2 | 53,7 | 45,0 | 34,6 |
| Lámina árbol (mm/árbol) | 426,11 | 775,9 | 1.002,7 | 1.200,8 |
| EUA (kg/árbol/mm) | 0,071 | 0,069 | 0,04 | 0,03 |

Fuente: Elaboración propia

En Herveo, para el tratamiento 1 (T1) se obtuvo la mejor EUA de riego con un valor de 2,39 kg/mm, seguido por el T2, con un valor de EUA igual a 2,08 kg/mm, similar a lo obtenido por Adato y Levinson (1988) y Michelakis et al. (1997), con un $K_c = 0,6$ en la variedad Fuerte. El valor más bajo se obtuvo con T4 (testigo). También se observó que el T1 y T3 obtuvieron rendimientos similares; sin embargo, el índice de EUA fue mayor para T1, lo que indica que aplicar una mayor lámina de agua no garantiza un incremento en la producción y, por el contrario, se está utilizando una cantidad de agua no requerida que pueda elevar los costos de producción y sobreexplotación del recurso.

En Morales, la EUA fue mayor con T1, en comparación con los otros tratamientos, obteniendo un valor para el indicador de 0,37 kg/mm. Con T4, se obtuvo el menor valor de EUA (0,04 kg/mm), asociado a la baja producción reportada para esta lámina. Los valores obtenidos para esta localidad se encuentran por debajo de lo reportado por Adato y Levinson (1988) y Michelakis et al. (1997). No obstante, es importante anotar que, para esta localidad, se obtuvieron muy bajos rendimientos en comparación a Herveo, pero se mantuvieron por encima del promedio nacional, que se encuentra en 6,55 t/ha (Agronet 2014). En términos económicos, T3 presenta una mejor relación beneficio costo (tabla 18).

De acuerdo con la tabla 15, para Rionegro, T1 tuvo el valor más alto del indicador EUA, seguido por T2. Ambos valores estuvieron por debajo de lo reportado por Adato y Levinson (1988) y Michelakis et al. (1997), y de lo encontrado en las otras localidades. No obstante, al definir los tratamientos

en términos económicos el T2 obtuvo una mayor relación beneficio costo, en comparación con los demás tratamientos (tabla 19).

Si bien al aplicar una lámina de riego correspondiente a un $K_c=0,5$ (T1) el EUA tuvo el mejor comportamiento en las tres localidades, la lámina de $K_c=0,75$ obtuvo un mayor rendimiento y una mejor relación beneficio/costo (tabla 17 y 19) en las localidades de Herveo y Rionegro, comparada con los demás tratamientos aplicados, indicando que, llevando este indicador a términos económicos, una lámina del 0,75 ETO puede ofrecer un ahorro del agua hasta del 36%, en comparación con T3, sin afectar negativamente el rendimiento y el calibre de los frutos, lo que a su vez implica mejores ingresos para el productor. En Morales, con la lámina de $K_c=1,0$, se obtuvo un mayor rendimiento y una mejor relación beneficio/costo (tabla 18), comparada con los demás tratamientos aplicados.

Análisis de costos

Para maximizar la eficiencia de los recursos, se requiere la implementación de tecnologías que se adapten al medio y recursos disponibles. Dado que este trabajo busca la evaluación del uso eficiente del agua, aplicando un sistema de riego con diferentes láminas de riego para la producción de aguacate Hass (en términos de nivel y calidad), comparándolo con el sistema productivo habitual sin uso de sistema de riego —donde la producción depende directamente del medio ambiente y un manejo básico agrícola—, el objetivo fundamental de este es ofrecer al agricultor recomendaciones adaptadas a sus condiciones.

Para este fin, se aplicó el método costo/eficiencia (C/E), usual en evaluación de alternativas de proyectos (en este caso alternativas de manejo sostenible del riego en el cultivo del aguacate Hass), en los que la cuantificación de los beneficios es compleja y se admite que las alternativas proporcionen el mismo o similar beneficio (mejora en la producción, medida en número de frutos y calidad). Por tanto, se puede establecer la comparación por el ámbito de los costos: se procede cuantificando el costo por unidad beneficiada (área sembrada de aguacate Hass) y seleccionando aquella alternativa de menor costo o costo mínimo (Cruz-Cerón 2005).



Definiendo la eficiencia en términos económicos y para la aplicación de este trabajo, según Just et al. (1981), la eficiencia económica se relaciona con el máximo nivel posible de producción y de consumo que permitan los recursos de los que se dispone.

Para conocer la eficiencia de un proyecto es necesario estimar el valor presente neto (VPN) de los beneficios y de los costos totales. Para ello, es necesario determinar el número de periodos de tiempo durante los cuales se percibirán beneficios y durante los que se incurrirá en costos; adicionalmente, es necesario escoger una tasa de descuento (r) (Uribe et al. 2003).

Mediante la ecuación 7, se calcula el valor presente neto de los beneficios totales, definidos para este caso como ingresos brutos o totales.

$$VPN (IT) \sum_{t=1}^T \frac{Ingresos\ totales}{(1+r)^t} \quad (\text{Ecuación 7})$$

En esta ecuación, VPN es valor presente neto, IT es ingresos totales, t es períodos de tiempo durante los cuales se recibirán ingresos y r es la tasa de descuento.

Para estimar el valor presente neto de los costos totales del proyecto se procede de la misma manera, aplicando la ecuación 8.

$$VP (IN) = VPN (IT)_t - VPN (CT)_t > 0 \quad (\text{Ecuación 8})$$

En la ecuación 8, VP es valor presente, IN es ingresos netos, VPN es valor presente neto, IT es ingresos totales, t es períodos de tiempo durante los cuales se recibirán ingresos y CT es costos totales.

En general un proyecto será viable si los beneficios totales que se generan son mayores a los costos totales de desarrollarlo, en valor presente, es decir, si el valor presente de los beneficios o ingresos netos (VPIN) —estimado como la diferencia entre el valor presente neto de los beneficios o ingresos totales y de los costos totales— es mayor a cero para el periodo de tiempo determinado (Uribe et al. 2003).

Este indicador permitió definir y evaluar cada una de las alternativas de riego aplicadas, midiendo este indicador en términos netamente monetarios. Así, se tendrán en cuenta los flujos de ingresos y egresos que se distribuyen a lo largo de cada ciclo —dado que la producción del aguacate se tiene en ciclos— y duración del proyecto, considerando la extensión en tiempo de cada periodo fraccionado.

Para definir la tasa de descuento, se tendrá como tasa de descuento la proporcionada por el Banco Mundial, dado que para Colombia se tiene en cuenta la tasa de interés real del capital, según el Banco Mundial para Colombia 2014 (8,9 %) y la tasa de descuento usada por agencias externas de financiamiento que corresponde al 12 % para proyectos sociales.

En la tabla 16 se describen las variables escogidas para la evaluación de cada alternativa y cálculo de VPN.

Tabla 16. Variables para evaluación económica

| Ítem | Descripción |
|---|--|
| $IT = \text{número de frutos (calidad)} * (\text{precio de mercado})$ | <ul style="list-style-type: none"> Número de frutos por alternativa aplicada. Selección de calidades del fruto Precio por cada una de las calidades del fruto en el mercado |
| $CT = (\text{costos de instalación}) + (\text{costos fijos}) + (\text{costos variables}) + (\text{otros costos})$ | <ul style="list-style-type: none"> Los costos fijos son aquellos que independientes al nivel de producción, teniendo en cuenta el periodo de amortización. (maquinaria y mejoras, gastos de estructura). Los costos variables son los insumos que influyen en los niveles de producción, ya sea aumento o disminución de los mismos, mano de obra (número de jornales y precio del mismo en la zona, usados para diferentes actividades de manejo del cultivo; dado que el trabajo se realizó con árboles ya establecidos, no se tienen en cuenta los costos de mano de obra en el terreno), manejo de plagas y enfermedades (insumos aplicados, cantidad y precio). |

Fuente: Elaboración propia



Para el siguiente análisis, se muestra el cálculo del VPN (o VAN por sus siglas en inglés) para un periodo de cinco años, dada la vida útil del sistema de riego, proyectando el incremento en los ingresos monetarios y costos monetarios con una tasa promedio de inflación calculada para un periodo de 2011-2015.

Herveyo

Calculando una producción constante durante el periodo, se tiene la maximización de los ingresos por cada tratamiento de riego aplicado dado el VPN, en el que todos los valores calculados se encuentran mayores a cero. Según estos resultados, T2 presenta mayor maximización de los ingresos netos. Así mismo, para el cálculo de C/E se tiene que todas las láminas usadas presentan valores < 1 , lo que indica que los ingresos netos siempre fueron mayores a la inversión realizada; sin embargo, los resultados obtenidos muestran que, para esta localidad, T2 presenta una mayor eficiencia con un mínimo de costos monetarios, como lo indica la figura 14, donde el punto más cercano a cero indica una mayor eficiencia respecto a un mínimo de costos.

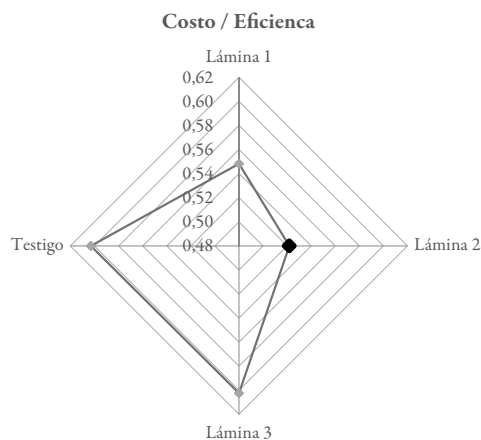


Figura 14. Relación costo-eficiencia de aplicación de los tratamientos de riego para la localidad de Herveyo.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17. Valor presente neto y relación costo-eficiencia para cada uno de los tratamientos en la localidad de Herveo

| Tratamiento | VPN | Comparativo | C/E | Comparativo |
|-------------|--------------|-------------|------|-------------|
| T1 | \$36.518.187 | >0 | 0,55 | <1 |
| T2 | \$44.077.801 | >0 | 0,52 | <1 |
| T3 | \$33.765.997 | >0 | 0,60 | <1 |
| T4 | \$24.923.950 | >0 | 0,60 | <1 |

Fuente: Elaboración propia

La diferencia entre los tratamientos T1, T2, T3 y T4 reside en la aplicación de láminas de agua y el costo de estas por m³. Se observó que con la aplicación de T2 se presentan ingresos netos mayores a la aplicación de T1, T3 y T4, donde la producción no se reflejó proporcional a la cantidad de agua aplicada por tratamiento evaluado. En este sentido, aplicar riego al cultivo de aguacate con $K_c=0,75$ bajo las condiciones de Herveo genera una mejor relación C/E, lo que implica mejores ingresos para el productor.

Morales

De acuerdo con los resultados presentados en la tabla 18, se observa que para el tratamiento T2 se tiene un decremento en los ingresos, dado que el VPN es negativo; si bien los demás valores calculados son positivos, no explica la factibilidad total la aplicación de cada lámina, por lo que al analizar el comparativo C/E se observó que todos los valores calculados son >1; por lo tanto, se muestra que con cada tratamiento aplicado, incluyendo T4 (testigo), los costos superan los ingresos promedio en el periodo calculado, por tanto no presentan eficiencia, dados los costos incurridos. La figura 15 muestra por tratamiento los puntos C/E, donde el más cercano a cero indica una mayor eficiencia respecto a un mínimo de costos.

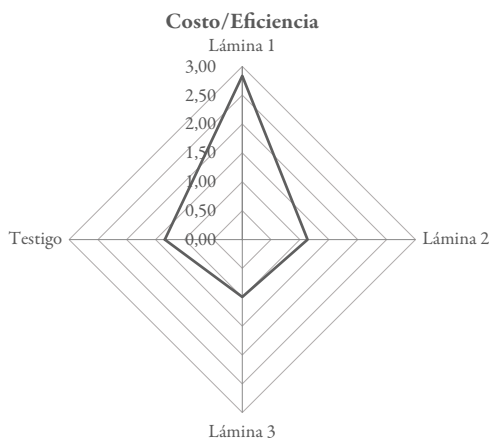


Figura 15. Relación costo-eficiencia de aplicación de los tratamientos de riego de la localidad de Morales.
Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Valor presente neto y relación costo-eficiencia para cada uno de los tratamientos en la localidad de Morales

| Tratamiento | VPN | Comparativo | C/E | Comparativo |
|-------------|--------------|-------------|------|-------------|
| T1 | \$8.465.863 | >0 | 2,88 | >1 |
| T2 | -\$3.726.786 | <0 | 1,13 | >1 |
| T3 | \$32.596.723 | >0 | 1,00 | >1 |
| T4 | \$139.328 | >0 | 1,34 | >1 |

Fuente: Elaboración propia

La diferencia radica en la producción del ciclo 1, en el que los ingresos netos fueron negativos; aunque en el ciclo 2 los ingresos aumentaron, estos no alcanzaron a cubrir los costos de producción del ciclo 1. Además, se observó que, a partir del año 2, se obtienen valores de C/E menores a uno, dado el incremento en los ingresos por producción de los tratamientos T1 y T3, siendo T3 el que registra menores costos respecto a las demás. T4 reporta los costos más bajos, pero refleja menores ingresos, por lo que sus ingresos netos

calculados reflejan el VPN más bajo respecto a los demás tratamientos y un C/E calculado mayor junto con T2.

Rionegro

En esta localidad, el tratamiento T2 presenta mayor maximización de los ingresos netos respecto a T1 y T3; sin embargo, se evidencia que el T4 muestra una maximización del ingreso mayor a las láminas aplicadas. Así mismo, para el cálculo de C/E se tiene que todos los tratamientos evaluados presentan valores <1, lo que indica que siempre los ingresos netos fueron mayores a los costos ocasionados. En este sentido, y tal como se muestra en la tabla 19, el uso de un $K_c = 0,75$ presenta una mayor eficiencia con un mínimo de costos; aunque el testigo presenta un valor de C/E más bajo que T2, es importante resaltar que cuando se presente época seca se requiere aplicar agua, y la mejor opción es T2 ($K_c = 0,75$), de acuerdo con los resultados de rendimiento y económicos.

Tabla 19. Valor presente neto y relación costo-eficiencia para cada uno de los tratamientos en la localidad de Rionegro

| Tratamientos | VPN | Comparativo | C/E | Comparativo |
|--------------|--------------|-------------|------|-------------|
| T1 | \$1.357.377 | >0 | 0,94 | <1 |
| T2 | \$32.008.682 | >0 | 0,56 | <1 |
| T3 | \$595.168 | >0 | 0,97 | <1 |
| T4 | \$34.634.361 | >0 | 0,50 | <1 |

Fuente: Elaboración propia



En la figura 16, se resume el comportamiento de los tratamientos en cuanto a la relación C/E, siendo el punto más cercano a cero el que indica una mayor eficiencia respecto a un mínimo de costos.

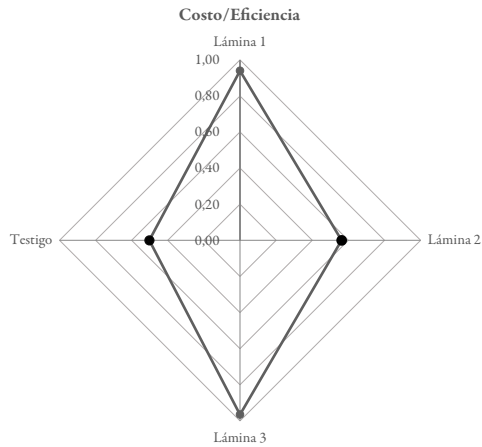


Figura 16. Relación costo-eficiencia de aplicación de los tratamientos de riego para la localidad de Rionegro.

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

Al aplicar una lámina de riego con un $K_c = 0,5$, el EUA tuvo el mejor comportamiento en las tres localidades; sin embargo, con la lámina de $K_c = 0,75$ se obtuvo un mayor rendimiento y una mejor relación beneficio/costo en Rionegro y Herveo, comparada con los demás tratamientos aplicados, lo que indica que —llevando este indicador a términos económicos— una lámina del 0,75 ETo puede tener un ahorro del agua hasta del 36 %, en comparación con el uso de un $K_c = 1,0$, sin afectar negativamente el rendimiento y el calibre de los frutos, lo que a su vez implica mejores ingresos para el productor.

En Morales, el mejor rendimiento y la mejor relación beneficio-costo se obtuvieron con la lámina 100 % ETo, siendo posible recomendar un $K_c = 1,0$ para regar en la etapa productiva del cultivo.

Finalmente, se observó cómo las zonas se vieron afectadas por el fenómeno de El Niño del 2015, época durante la que fue indispensable contar con un sistema de riego y una metodología clara para la aplicación de las láminas. Si los agricultores de aguacate empiezan a implementar estas metodologías, podrán hacer sus sistemas más eficientes y resilientes al cambio climático.



Los autores

Diana Yaritza Dorado Guerra

Ingeniera agrícola de la Universidad del Valle, magíster en Ciencias Agrarias con énfasis en Suelos de la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira; con experiencia en investigación en la relación suelo, agua, planta, atmósfera, manejo del recurso hídrico, valoración química y física de suelos y fertilización en frutales y cultivos transitorios (maracuyá, cítricos, melón, aguacate, praderas y papa) en la región pacífica y andina de Colombia. En la actualidad, se desempeña como investigadora en el área de manejo y conservación de suelos y aguas en los siguientes proyectos: “Estimación de la producción de pasturas y optimización del agua”, “Mejoramiento tecnológico y productivo del sistema de papa en el departamento de Nariño” y “Estrategias para la conformación y el fortalecimiento de los sistemas territoriales de innovación (STI)” en la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica).

Luis Carlos Grajales

Ingeniero agrícola de la Universidad del Valle, estudiante de maestría en Ingeniería Ambiental en la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, con énfasis en monitoreo, modelación y gestión de recursos naturales. Ha participado en proyectos de investigación en manejo del recurso hídrico de cultivos frutales como cítricos, maracuyá y aguacate. En la actualidad, se desempeña como profesional de apoyo en la investigación en la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica) en el área de manejo y conservación de suelos y aguas.



Alexander Rebolledo

Ingeniero agrónomo, PhD en Biología Vegetal con énfasis en Fisiología Vegetal de la Universidad Politécnica de Valencia, España, y con enfoque de investigación en el estudio de los factores externos (factores edafoclimáticos) e internos (relación fuente sumidero, contenido mineral y hormonal endógeno, relaciones hídricas, etc.), que determinan el comportamiento productivo de especies frutales (cítricos, aguacate, pitaya) en diferentes zonas productoras del país. Ha sido profesor del área de fisiología vegetal de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, y actualmente se desempeña como Investigador Principal Delegado del macroproyecto de Aguacate a nivel nacional en la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica).

Referencias

- Adato I, Levinson B. 1988. Influence of daily intermittent drip irrigation on avocado (cv. Fuerte) fruit yield and trunk growth. *J Hortic Sci.* 63(4):675-685.
- Agronet. 2014. Evaluaciones agropecuarias municipales (EVA). [consultado 2016 ago 18]. <http://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/default.aspx>.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper.* 56:1-333.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *Estudio FAO riego y drenaje.* 56:1-323.
- Anguiano CJ, Alcántar JJ, Toledo BR, Tapia LM, Vidales-Fernández JA. 2007. Caracterización edafoclimática del área productora de aguacate de Michoacán, México. En: *International Avocado Society. Proceedings VI World Avocado Congress (Actas VI Congreso Mundial del Aguacate).* Viña del Mar, Chile: International Avocado Society.
- Arévalo-Hernández JJ. 2011. Evaluación del efecto de la aplicación de diferentes láminas de riego en el cultivo de rosa (*Rosa sp.*) cv. Freedom, bajo invernadero en la sabana de Bogotá [tesis de maestría]. [Bogotá, Colombia]: Universidad Nacional de Colombia.
- Arnalds O, Stahr K. 2004. Volcanic soil resources: occurrence, development, and properties. *Catena.* 56(1-3):1-2.
- Avilán L, Soto E, Pérez M, Rodríguez M, Ruiz J. 2007. Fenología de cultivares e híbridos de aguacate de la raza mexicana en la región centro-norte costera de Venezuela. *Agronomía Trop.* 57(2):89-98.



- Barrientos-Priego AF, López-López L. 1998. Historia y genética del aguacate. En: [CICTAMEX] Centro de Investigaciones científicas y Tecnológicas del Aguacate en el Estado de Mexico. Memoria Fundación Salvador Sánchez Colín, 1998-2001. Coatepec Harinas, México: CICTAMEX. pp. 33-51.
- Bartoli JA. 2008. Manual técnico del cultivo del aguacate Hass (*Persea americana* L.). La Lima, Honduras: Fundación Hondureña de Investigación.
- Bernal JA, Díaz CA. 2005. Tecnología para el cultivo del aguacate. Rionegro, Colombia: [Corpoica] Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria
- Bisonó SM, Hernández JR. 2008. Guía tecnológica sobre el cultivo del aguacate. Santo Domingo, República Dominicana: Consejo Nacional de Competitividad.
- Blaney HF, Morin KV. 1942. Evaporation and consumptive use of water empirical formulas. EOS, Trans Am Geophys Union. 23(1):76-83
- Bower JP. 1988. Pre- and postharvest measures for long-term storage of avocados. S Afr Avocado Grow Assoc Yearb. 11:68-72.
- Bozzolo E. 1993. Aproximación a la determinación de los coeficientes de cultivo (Kc) en palto (*Persea americana* Mill.) cv. Hass para la zona de Quillota. V Región. Quillota, Chile: Facultad de Agronomía, Universidad Católica de Valparaíso.
- Cardemil GM. 1999. Aproximación a los requerimientos hídricos del palto (*Persea americana* Mill) cv. Hass para la provincia de Quillota. Quillota, Chile: Facultad de Agronomía, Universidad Católica de Valparaíso.
- Casierra-Posada F, Aguilar-Avenidaño OE. 2007. Estrés por aluminio en plantas: reacciones en el suelo, síntomas en vegetales y posibilidades de corrección. Rev Colomb Cienc Hort. 1(2):246-257.
- Cortez A, Núñez MC, Rodríguez MF. 2007. Adaptabilidad agroecológica del cultivo del aguacate en el estado Aragua, Venezuela. Bioagro. 19(2):85-90.

- Cossio-Vargas LE, Salazar-García S, González-Durán IJL, Medina-Torres R. 2007. Algunos aspectos reproductivos del aguacate 'Hass' en clima semicálido. En: International Avocado Society. Proceedings VI World Avocado Congress (Actas VI Congreso Mundial del Aguacate). Viña del Mar, Chile: International Avocado Society.
- Cruz-Cerón G. 2005. Economía aplicada a la valoración de impactos ambientales. Manizales, Colombia: Editorial Universidad de Caldas.
- [DANE] Departamento Administrativo Nacional de Estadística. 2016. Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA 2015). Boletín técnico. Bogotá: DANE; [consultado 2016 mar 10 2016]. https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/enda/ena/2015/boletin_ena_2015.pdf.
- Davenport T. 1986. Avocado flowering. Hort Rev. 8:257-289.
- Dixon J, Sher D. 2002. Pollination of avocados. Annual Research Report of New Zealand Avocado Growers Association. 2:31-40.
- [DNP] Dirección Nacional de Planeación. 2010. Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014. Bogotá, Colombia: DNP.
- Doorenbos J, Pruitt WO. 1977. Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drain Paper. 24:1-145.
- Dorado D, Tafur H, Ríos L. 2013. Rendimiento y calidad de la fruta del maracuyá amarillo (*Passiflora edulis* fo. *Flavicarpa* o. Deg.) en respuesta a la combinación de riego y la fertilización. Revista Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente. 12:109-117.
- Dubrovina IA, Bautista F. 2014. Analysis of the suitability of various soil groups and types of climate for avocado growing in the state of Michoacan, Mexico. Eurasian Soil Sci. 47(5):491-503.
- Enciso JM, Porter D, Périès X. 2007. Uso de sensores de humedad del suelo para efficientizar el riego. Austin, Texas: Comunicaciones Agrícolas, Sistema Universitario Texas A&M.



- Faber B, Apaia M, Yates M. 1995. Irrigation management of avocado in a California coastal environment. Ponencia presentada en: World avocado Congress III. Israel.
- [FAO] Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 2000. Manual de captación y aprovechamiento del agua de lluvia. Experiencias en América Latina. Serie Zonas Áridas y Semiáridas N.º 13. Santiago de Chile: FAO.
- [FAOSTAT] Food and Agriculture Organization of United Nations. 2011. Crops. FAO; [consultado 2012 may 15]. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
- Ferreyra R, Selles G, Gil P, Ruiz R, Barrera C, Maldonado P, Celedón J. 2007. Manejo del riego y suelo en palto. Boletín del Instituto de Investigaciones Agropecuarias [INIA] del Gobierno de Chile. 160:1-123.
- Ferreyra R, Sellés G. 2011. Algunas consideraciones del manejo de riego en cítricos. Tierra Adentro. (94):66-74.
- Fischer G, Shah M, Tubiello FN, Van Velthuisen H. 2005. Socio-economic and climate change impacts on agriculture: an integrated assessment, 1990-2080. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci. 360(1463):2067-2083.
- Gandolfo SPR. 2008. Factores ecofisiológicos relacionados con el crecimiento vegetativo, floración y desarrollo del fruto del aguacate [tesis doctoral]. [Valencia, España]: Universidad Politècnica de València.
- García-Tejero I, Romero-Vicente R, Jiménez-Bocanegra JA, Martínez-García G, Durán-Zuazo VH, Muriel-Fernández JL. 2010. Response of citrus trees to deficit irrigation during different phenological periods in relation to yield, fruit quality, and water productivity. Agric Water Manage. 97(5):689-699.
- Garner LC, Lovatt CJ. 2008. The relationships between flower and fruit abscission and alternate bearing of 'Hass' avocado. J Am Soc Hortic Sci. 133(1):3-10.

- Gorantiwar SD, Smouth IK. 2005 Performance assessment of irrigation water management of heterogeneous irrigation schemes: 1. A framework for evaluation. *Irrig Drain*. 19:1-36.
- Hargreaves GH, Samani ZA. 1982. Estimating potential evapotranspiration. *J Irr Drain Div ASCE*. 108(IR3):223-230.
- Hargreaves GH, Samani ZA. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl Engine Agric*. 1(2):96-99.
- Holdridge LR, Tosi JA, Grenke WC, Hatheway WH, Liang T. 1971. Forest environments in tropical life zones, a pilot study. Oxford, Reino Unido: Pergamon Press.
- [Ideam] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. 2015a. Estudio Nacional del Agua 2014. [consultado 2015 ago 3]. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf.
- [Ideam] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. 2015b. Boletín informativo sobre el monitoreo de los fenómenos de “El Niño” y “La Niña”. [consultado 2015 mar 16]. http://www.ideam.gov.co/web/pronosticos-y-alertas/pronosticos-alertas/fenomenos-el-nino-y-la-nina/-/document_library_display/8joWMReTv53x/view/397201?_110_INSTANCE_8joWMReTv53x_redirect=http%3A%2F%2Fwww.ideam.gov.co%2Fweb%2Fpronosticos-y-alertas%2Fpronosticos-alertas%2Ffenomenos-el-nino-y-la-nina%3Fp_p_id%3D110_INSTANCE_8joWMReTv53x%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-1%26p_p_col_pos%3D1%26p_p_col_count%3D2.
- [IGAC] Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 2007. Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras. Departamento de Antioquia. Bogotá, Colombia: IGAC.



- [IGAC] Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 2008a. Estudio general de suelos y zonificación de tierras. Departamento de Cauca. Bogotá, Colombia: IGAC.
- [IGAC] Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 2008b. Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras. Departamento de Tolima. Bogotá: IGAC.
- Jaramillo DF. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Jensen ME, Burman RD, Allen RG. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice. 70:1-332.
- Jiménez H. 1992. Hidrología básica. Cali, Colombia: Universidad del Valle.
- Just RE, Hueth DL, Schmitz A. 1981. Applied welfare economics and public policy. Englewood Cliffs, EE. UU.: Prentice Hall.
- Kopp LE. 1966. A taxonomic revision of the genus *Persea* in the Western Hemisphere (Perseae-Lauraceae). Mem New York Bot Gard. 14(1):1-120.
- Lahav E, Kalmar D. 1983. Determination of the irrigation regimen for an avocado plantation in spring and autumn. Aust J Agric Res. 34:717-724.
- Maldonado-Torres R, Álvarez-Sánchez ME, Almaguer-Vargas G, Barrientos-Priego AF, García-Mateos R. 2007. Estándares nutrimentales para aguacatero “Hass”. Rev Chapingo Ser Hortic. 13(1):103-108.
- Marín-Pimentel GE. 2010. Determinación de los requerimientos hídricos del cilantro (*Coriandrum sativum*), variedad Unapal precoso y su relación con el desarrollo del cultivo, la producción y la calidad, comparando un periodo seco y húmedo de siembra del cultivo en el año [tesis de maestría]. [Palmira, Colombia]: Universidad Nacional de Colombia.
- Michelakis N, Kiapaki G, Vouyoukalou E, Barbopulu E. 1997. Effect of drip lines number on the water use, wetted soil volume and yield of avocados. Acta Hort. 449:147-152.

- Molden D, Oweis T, Steduto P, Bindraban P, Hanjra MA, Kijne J. 2010. Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution. *Agric Water Manage.* 97(4):528-535.
- Monteith JL. 1965. Evaporation and environment. *Symp Soc Exp Biol.* 19:205-234.
- Newett SDE, Crane JH, Balerdi CF. 2007. Cultivares y portainjertos. En: Whiley AW, Schaffer B, Wolstenholme BN, editores. El palto. Botánica, producción y usos. Valparaíso, Chile: Ediciones Universitarias de Valparaíso. pp. 155-175.
- Oad R, Sampath RK. 1995. Performance measure for improving irrigation management. *Irrig Drain Syst.* 9(4):357-370.
- Ortega MA. 2003. Valor nutrimental de la pulpa fresca de aguacate Hass. En: International Avocado Society. Proceedings v World Avocado Congress (Actas v Congreso Mundial del Aguacate). Malaga, España: International Avocado Society. pp. 741-748.
- Panigrahi P, Srivastava AK, Huchche AD. 2012. Effects of drip irrigation regimes and basin irrigation on Nagpur mandarin agronomical and physiological performance. *Agric Water Manag.* 104:79-88.
- Pascual M, Villar JM, Rufat J. 2016. Water use efficiency in peach trees over a four years experiment on the effects of irrigation and nitrogen application. *Agric Water Manag.* 164(2):253-266.
- Penman HL. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc R Soc Lond A Math Phys Sci.* 194(1032):120-145.
- Pérez L, Rodríguez JA, Camacho E, López R. 2009. Gestión sostenible del agua de riego. Málaga, España: Analistas Económicos de Andalucía.
- Perry C, Steduto P, Allen RG, Burt CM. 2009. Increasing productivity in irrigated agriculture: Agronomic constraints and hydrological realities. *Agric Water Manag.* 96(11):1517-1524.
- Pizarro F. 1996. Riegos localizados de alta frecuencia. Madrid, España: Mundi-Prensa.



- Raes D. 2009. The ETo Calculator, Reference Manual, Versión 3.1. Roma, Italia: [FAO] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Rebolledo A, Romero MA. 2011. Avances en investigación sobre el comportamiento productivo del aguacate (*Persea americana* Mill.) bajo condiciones subtropicales. *Corpoica Cienc Tecnol Agropecuaria*. 12(2):113-120.
- Ríos L. 2003. Estudio del comportamiento de goteros que funcionan con el principio de la botella de Mariotte en diferentes tipos de suelo [trabajo de grado]. [Palmira, Colombia]: Universidad Nacional de Colombia.
- Salazar-García S. 2002. Nutrición del aguacate, principios y aplicaciones. Querétaro, México: [Inifap] Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, [Impofos] Instituto de la Potasa y el Fósforo.
- Santana L, Peña E. 2010. Obtención de modelos para la determinación de la evapotranspiración de referencia en condiciones de clima subhúmedo seco en las Tunas, Cuba. *Idesia*. 28(1):55-59.
- Serna S, Montoya B, Osorio W. 2012. Monitoreo del pH y fósforo soluble en la rizosfera de árboles de aguacate en el norte y oriente antioqueño. *Suelos Ecuator*. 42(2):186-190.
- Shaxson F, Barber R. 2005. Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. *Boletín de Suelos FAO*. 79:1-131.
- Silber A, Israeli Y, Levi M, Keinan A, Shapira O, Chudi G, Golan A, Noy M, Levkovitch I, Assouline S. 2012. Response of 'Hass' avocado trees to irrigation management and root constraint. *Agric Water Manage*. 104:95-103.
- Silva VPR, Campos JHBC, de Azevedo PV. 2009. Water-use efficiency and evapotranspiration of mango orchard grown in northeastern region of Brazil. *Sci Hort*. 120(4):467-472.

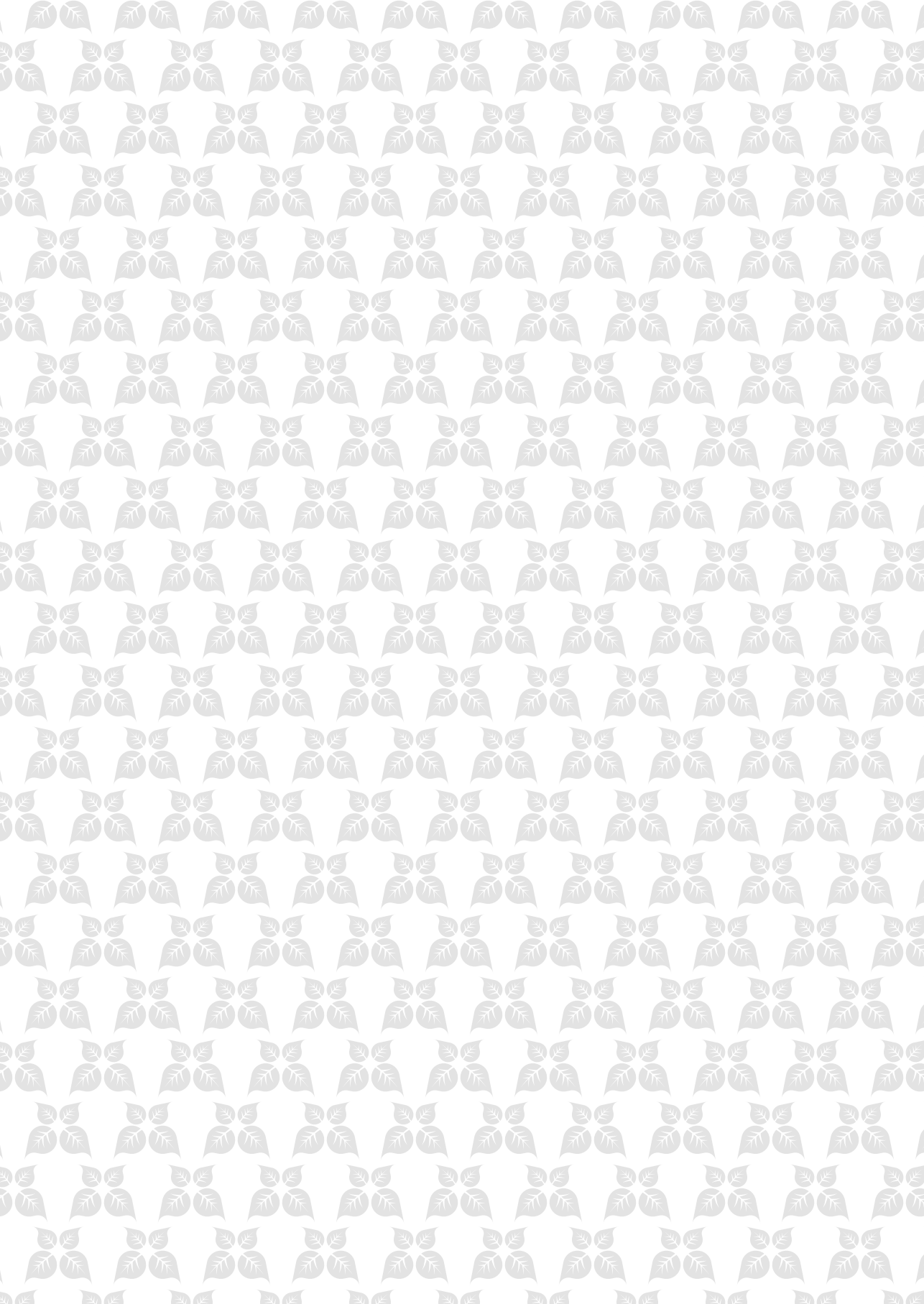
- Smith CE. 1966. Archeological evidence for selection in avocado. *Econ Bot.* 20(2):169-175.
- Smith M. 2000. Optimising crop production and crop water management under reduced water supply. Ponencia presentada en: 6th Micro-Irrigation Congress. Cape Town, South Africa.
- Tafur R, Toro JC, Negrette R. 2006. Plan Frutícola Nacional-Diagnóstico y análisis de los recursos para la fruticultura en Colombia. Santiago de Cali, Colombia: [MADR] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, [FNFH] Fondo Nacional de Fomento Hortofrutícola, [Asohofrucol] Asociación Hortofrutícola de Colombia, [SAG] Sociedad de Agricultores y Ganaderos del Valle del Cauca.
- Tapia LM, Larios A, Salazar S, Anguiano J. 2007. Efecto del clima y manejo de agua en el rendimiento y componentes del fruto de aguacate en Michoacán. En: International Avocado Society. Proceedings VI World Avocado Congress (Actas VI Congreso Mundial del Aguacate). Viña del Mar, Chile: International Avocado Society.
- Tubiello FN. 2005. Climate variability and agriculture: Perspectives on current and future challenges. En: Knight B, editor. Impact of climate change, variability and weather fluctuations on crops and their produce markets. Cambridge, Reino Unido: Impact Reports. pp. 45-63.
- Turc L. 1961. Evaluation des besoins en eau d'irrigation, evapotranspiration potentielle, formule climatique simplifiée et mise a jour. *Ann Agron.* 12(1):13-49.
- [UNESCO] Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. c2016. El ciclo del agua; USGS; [consultado 2016 may 18]. <http://water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>.

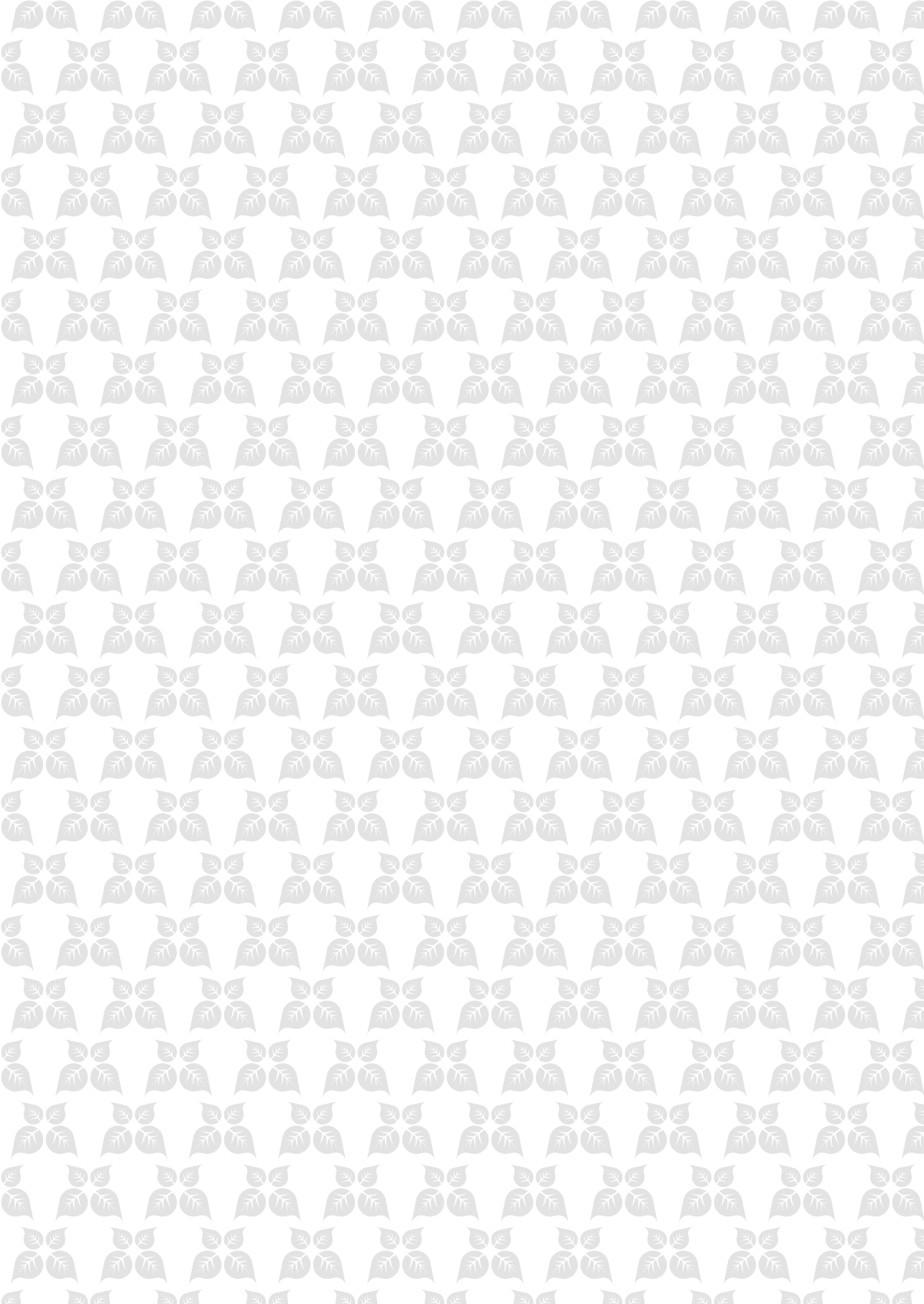


- Uribe E, Mendieta JC, Rueda H, Carriazo F. 2003. Introducción a la valoración ambiental y estudios de caso. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes.
- Vásquez K, Díaz O, Escobedo J, Rodríguez A. 2015. Estudio preliminar del efecto de diferentes volúmenes de riego sobre el crecimiento y el rendimiento del palto var. Hass, bajo condiciones de Salinas, Perú. Ponencia presentada en: VII Congreso Mundial de la Palta; Lima, Perú.
- Velásquez JA. 2006. Identificación del aguacate como un rubro importante de grandes oportunidades comerciales, según los acuerdos de integración, los nuevos tratados comerciales y el comercio mundial globalizado. Medellín, Colombia: Secretaría de Productividad y Competitividad de la Gobernación de Antioquia.
- Williams LO. 1977. The avocados, a synopsis of the genus *Persea*, subg. *Persea*. *Econ Bot.* 31(3):315-320.
- Whiley AW, Chapman KR, Saranah JB. 1988. Water loss by floral structures of avocado (*Persea americana* cv. Fuerte) during flowering. *Aust J Agric Res.* 39:457-467.
- Whiley AW, Schafer B, Wolstenholme BN. 2002. The avocado botany, production and uses. Nueva York, EE. UU.: CABI Publishing.
- Wolters W, Bos MG. 1990. Irrigation performance assessment and irrigation efficiency. 1989 Annual report. Wageningen, Holanda: International Institute for Land Reclamation and Improvement.

Impresión y encuadernación:
Digiprint editores

Terminó de imprimirse
Marzo de 2017, Bogotá, D. C., Colombia





Los cultivos comerciales de aguacate Hass en Colombia no manejan criterios técnicos para la aplicación de riego. Con el fin de definir la lámina de agua a aplicar en fase productiva del cultivo, durante dos años consecutivos, se evaluaron tres láminas de riego en cultivos comerciales de aguacate Hass (*Persea americana*) en tres zonas productoras del país. Los tratamientos se basaron en tres niveles de riego en función de la evapotranspiración de referencia (ETO): T1 = 0,5; T2 = 0,75; y T3 = 1,0. Se determinó la ETO con FAO-Penman Monteith y el cálculo de la lámina de riego se realizó con balance hídrico. Se analizó el efecto de las láminas de riego en la caída de flores y frutos, crecimiento del fruto, producción y eficiencia en el uso del agua. En la etapa inicial de llenado de fruto, no se observaron diferencias coincidiendo con un balance hídrico positivo. En la fase final de crecimiento del fruto, coincidiendo con un periodo de sequía de 95 días, se obtuvo un mayor diámetro de fruto y producción con T2 y T3 en comparación con T1 y el testigo, los rendimientos alcanzados fueron mayores a los promedios nacionales. Con T1 se obtuvo la mejor eficiencia en el uso del agua de riego (EUA) seguido por T2.



CORREO: bac@corpoica.org.co
TELÉFONO: (57 1) 422 73 00 EXT. 1257 o 1274
SKYPE: [biblioteca.agropecuaria](#)



Distribución gratuita
Prohibida su venta
www.corpoica.org.co



ASOCIACIÓN DE PRODUCTORES
DE AGUACATE
FRUTAS Y HORTALIZAS

