



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

USO RACIONAL DEL AGUA DE RIEGO EN CULTIVOS DE AGUACATE HASS (*Persea americana*) EN TRES ZONAS PRODUCTORAS DE COLOMBIA

Luis Carlos Grajales Guzmán

Universidad Nacional de Colombia sede Palmira

Facultad de Ingeniería y Administración

Palmira, Colombia

2017

USO RACIONAL DEL AGUA DE RIEGO EN CULTIVOS DE AGUACATE HASS (*Persea americana*) EN TRES ZONAS PRODUCTORAS DE COLOMBIA

Luis Carlos Grajales Guzmán

Trabajo de Tesis presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Ambiental

Director:

Ingeniero Agrícola M. Sc; D.Sc, Harold Tafur Hermann

Codirectora:

Ingeniera Agrícola M. Sc, Diana Dorado Guerra

Línea de Investigación:

Monitoreo, modelación y gestión de recursos naturales

Universidad Nacional de Colombia sede Palmira

Facultad de Ingeniería y Administración

Palmira, Colombia

2017

A mi madre, que desde donde esté guía mis pasos.

A mi papá por estar a mi lado siempre y apoyarme

A la luz de mis ojos, mi hermanita Ingrid, gracias por existir.

Resumen

El objetivo de este estudio fue evaluar indicadores de sostenibilidad ambiental para valorar la eficiencia en el suministro y productividad del agua en aguacate Hass (*Persea americana*) en huertos comerciales de tres regiones con mayor producción en Colombia (Morales-Cauca, Rionegro-Antioquia y Herveo-Tolima). Los indicadores evaluados fueron Suministro Relativo de Agua (Relative Water Supply-RWS), Suministro Relativo de Riego (Relative Irrigation Supply-RIS) y Eficiencia en el uso del agua (EUA) para dos ciclos de producción y tres tratamientos de riego basados en la evapotranspiración de referencia-ET_o (0.5ET_o; 0.75ET_o; 1.0ET_o). Los valores de RWS estuvieron entre 6.7 y 1.4 y en promedio para las tres localidades fue de 2.9 indicando que existe una adecuada relación entre la oferta y la demanda hídrica para suplir los requerimientos del cultivo. El indicador RIS permaneció por debajo de la unidad lo que permitió inferir que las lluvias pueden llegar a suplir eficientemente los requerimientos hídricos del cultivo. Los valores de EUA más altos se obtuvieron con T1 para las tres localidades, Herveo 9.55 kg/m³, Morales 4.4 kg/m³ y Rionegro 11.26 kg/m³.

Palabras clave: *eficiencia en el uso del agua, productividad del agua, suplemento relativo de agua suplemento relativo del riego*

Abstract

The aim of this study was to evaluate environmental sustainability indicators to assess the efficiency of water supply and productivity in Hass avocado (*Persea americana*) in commercial orchards in three regions with higher production in Colombia (Morales-Cauca, Rionegro-Antioquia and Herveo -Tolima). The indicators evaluated were Relative Water Supply (RWS), Relative Irrigation Supply (RIS) and Water Use Efficiency (WUE) for two production cycles and three irrigation treatments based on reference evapotranspiration-ET_o (0.5 ET, 0.75 ET, 1.0 ET). The RWS values were between 6.7 and 1.4 and on average for the three localities was 2.9 indicating that there is an adequate relationship between water supply and demand to meet crop requirements. The RIS indicator remained below the unit, which allowed to infer that rainfall can efficiently supply the water requirements of the crop. The highest US values were obtained with T1 for the three localities, Herveo 9.55 kg/m³, Morales 4.4 kg/m³ and Rionegro 11.26 kg/m³.

Key words: water use efficient, water productivity, relative water supply, relative irrigation supply

Contenido

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	4
1. REVISIÓN DE LITERATURA	5
1.1 Origen del aguacate	5
1.2 Contexto General	6
1.3 Requerimientos Hídricos	7
1.3.1 Requerimientos hídricos en aguacate	9
1.4 Indicadores de uso eficiente del agua en la agricultura	10
2. METODOLOGÍA	15
2.1 Localización del experimento	15
2.2 Caracterización de las parcelas experimentales en las zonas de estudio	17
2.3 Aproximación a los requerimientos hídricos del aguacate en fase de producción	19
2.3.1 Descripción del experimento	19
2.3.2 Programación de riego e instalación de sistema de riego	20
2.3.3 Variables de respuesta	25
2.4 Indicadores de sostenibilidad ambiental o de gestión del recurso hídrico	26
2.5 Análisis Estadístico	27
2.6 Análisis de costos	28
3. RESULTADOS	31
3.1 Caracterización general de las parcelas de estudio	31
3.1.1 Caracterización climática	33
3.1.2 Caracterización Edáfica	39
3.2 Aproximación a los requerimientos hídricos del cultivo	46
3.2.1 Evaluación rendimiento	48
3.2.2 Análisis económico	55
3.3 Indicadores de sostenibilidad ambiental	60
3.3.1 Eficiencia en el uso del agua (EUA)	60
3.3.2 Indicadores de gestión del agua de riego	63
4. CONCLUSIONES	69
5. BIBLIOGRAFÍA	71
6. ANEXOS	81

Lista de figuras

Figura 2-1. Lote experimental, finca Los Arrayanes. Herveo, Tolima [Tomada por L.Grajales]	16
Figura 2-2. Lote experimental, finca La Escondida. Rionegro, Antioquia. [Tomada por L.Grajales]	16
Figura 2-3. Lote experimental, finca El Recuerdo. Morales-Cauca. [Tomada por L.Grajales]	17
Figura 2-4. Esquema general de parcela experimental y distribución de árboles	20
Figura 2-5. Instalación de tanque evaporímetro y estación meteorológica en zonas de ejecución. [Tomadas por D.Dorado]	22
Figura 2-6. Esquema metodológico para la implementación del balance hídrico. [Allen et al., 2006]	23
Figura 2-7. Esquema del área humedecida por el sistema de riego instalado. [Dorado et al., 2017]	24
Figura 3-1. Calendario fenológico de aguacate Hass en las tres zonas de estudio.	32
Figura 3-2. Balance hídrico multianual Herveo, Tolima. (Modificado de Dorado et al., 2017)	34
Figura 3-3. Balance hídrico realizado en el huerto experimental Finca Los Arrayanes, durante el período 2013-2015. (Modificado de Dorado et al., 2017)	35
Figura 3-4. Balance hídrico multianual, Rionegro (Antioquia). (Modificado de Dorado et al., 2017)	36
Figura 3-5. Balance hídrico realizado en el huerto experimental Finca La Escondida, durante el período 2013-2016. (Modificado de Dorado et al., 2017)	37
Figura 3-6. Balance hídrico multianual, Morales (Cauca). (Modificado de Dorado et al., 2017)	38
Figura 3-7. Balance hídrico realizado en el huerto experimental Finca El Recuerdo, durante el período 2013-2015. (Modificado de Dorado et al., 2017)	38
Figura 3-8. Perfiles de suelo en cada localidad, de izquierda a derecha: A. Morales, B. Herveo, Rionegro (C. suelo con capa orgánica y D. suelo sin capa orgánica). Tomadas por Dorado, D.	45
Figura 3-9. Distribución del riego durante los ciclos productivos evaluados en las tres localidades. Fuente: (Modificado de Dorado et al., 2017).	48
Figura 3-10. Rendimiento promedio entre los ciclos evaluados 2014-2015. Rionegro-Antioquia. Fuente: Elaboración propia	51

Figura 3-11. Comportamiento de la velocidad del viento en el municipio de Morales (Cauca). Fuente Dorado et al., 2017	53
Figura 3-12. Rendimiento promedio entre los ciclos evaluados 2014-2015. Morales-Cauca. Fuente: Elaboración propia	53
Figura 3-13. Rendimiento promedio entre localidades y ciclos evaluados. Fuente: Elaboración propia	54
Figura 3-14. Relación costo-eficiencia (C/E) de aplicación de los tratamientos de riego. Herveo. Fuente: Dorado et al., 2017	56
Figura 3-15. Relación costo-eficiencia de aplicación de los tratamientos de riego. Morales. Fuente: Dorado et al., 2017	58
Figura 3-16. Relación costo-eficiencia de aplicación de los tratamientos de riego. Rionegro	59
Figura 3-17. Eficiencia en el uso del agua promedio para las tres localidades. Fuente: Elaboración propia	62
Figura 3-18. Valores de indicador RIS para las zonas de estudio y tratamientos de riego evaluados.	65
Figura 3-19. Comportamiento de los indicadores RWS y RRS en las zonas de estudio por tratamientos de riego.	67

Lista de tablas

Tabla 2-1. Variables para evaluación económica _____	29
Tabla 3-1. Características generales de las parcelas de estudio _____	31
Tabla 3-2. Registro de inicial de cosecha. 2013 _____	32
Tabla 3-3. Resultados de los análisis físicos. Finca Los Arrayanes _____	41
Tabla 3-4. Resultados de análisis físico de suelos. Finca La Escondida _____	43
Tabla 3-5. Resultados de análisis físico de suelos. Finca El Recuerdo _____	45
Tabla 3-6. Lámina y volumen de agua aplicado por árbol en los ciclos evaluados 2014-2015. _____	46
Tabla 3-7. Análisis de varianza para rendimiento (t/ha). Herveo – Tolima _____	48
Tabla 3-8. Efecto de diferentes regímenes de manejo del agua de riego en el rendimiento (t/ha) del cultivo de aguacate Hass. Herveo - Tolima _____	49
Tabla 3-9. Análisis de varianza para rendimiento (t/ha). Rionegro-Antioquia _____	49
Tabla 3-10. Efecto de diferentes regímenes de manejo del agua de riego en el rendimiento (t/ha) del cultivo de aguacate Hass. Rionegro-Antioquia _____	50
Tabla 3-11. Análisis de varianza para rendimiento (t/ha). Morales-Cauca _____	51
Tabla 3-12. Efecto de diferentes regímenes de manejo del agua de riego en el rendimiento (t/ha) del cultivo de aguacate Hass. Morales-Cauca _____	52
Tabla 3-13. Análisis de varianza para rendimiento (t/ha) entre localidades _____	54
Tabla 3-14. Valor presente neto y relación costo-eficiencia (C/E). Herveo _____	56
Tabla 3-15. Valor presente neto y relación costo-eficiencia (C/E). Morales _____	57
Tabla 3-16. Valor presente neto y relación costo-eficiencia (C/E). Rionegro _____	59
Tabla 3-17. Uso eficiente del agua en Herveo, Tolima _____	60
Tabla 3-18. Uso eficiente del agua en Morales, Cauca _____	61
Tabla 3-19. Uso eficiente del agua en Rionegro, Antioquia _____	61
Tabla 3-20. Valores promedio para las tres localidades de RWS, RIS y RRS _____	64
Tabla 3-21. Valores promedio para tratamientos de riego de RWS, RIS y RRS _____	64

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la agricultura, como actividad productiva, históricamente ha estado afectada por la disponibilidad de agua, restringiendo o facilitando su crecimiento. La degradación ambiental, la distribución desigual y consumo excesivo de los recursos naturales, el cambio climático y la variabilidad climática a las que se enfrenta hoy la humanidad afectan negativamente la agricultura, la agroindustria, las cadenas de abastecimiento y la seguridad alimentaria (Fischer *et al.*, 2005). Sumado a lo anterior, el crecimiento poblacional, presionan fuertemente el uso de los recursos naturales, por lo cual es imperativo establecer una gestión eficaz de los recursos, siendo el agua cada vez más esencial en la sostenibilidad de la vida humana.

La agricultura en Colombia es uno de los principales pilares de la economía del país y posee el 46,6% del total de la demanda hídrica nacional (IDEAM, 2015a). Por esta razón uno de los enfoques fundamentales de la investigación agrícola es el de los requerimientos hídricos del cultivo, que permitan el manejo del riego, para obtener mejores producciones con un óptimo manejo del recurso hídrico en los cultivos (Tafur *et al.*, 2006). En el país, este ha sido uno de los temas centrales para la formulación de políticas que propendan por el desarrollo sostenible (DNP, 2010; Acuerdos de paz).

En este sentido una de las especies con mayor demanda de investigación es el cultivo de aguacate (*Persea americana*). 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, el cual es usado para el consumo en fresco y la industria, por su gran aporte de aminoácidos esenciales y vitaminas (Ortega, 2003). Ante esta situación se ha 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 pasando a ser el cuarto productor de aguacate en el mundo contribuyendo con un 6,43% de la producción mundial (FAOSTAT, 2011).

El aguacate Hass en Colombia se produce sin riego, dependiendo de las lluvias para garantizar la producción. En la zona andina donde se ubican las principales zonas productoras de este cultivar, presenta un régimen hídrico con balance positivo durante la mayor parte del ciclo productivo, sin embargo, la distribución de las lluvias no es uniforme, ocasionando un período de déficit hídrico que coincide con la etapa de floración y llenado de fruto (junio-agosto), etapas fenológicas de mayor sensibilidad a condiciones ambientales desfavorables como la disponibilidad de agua para suplir los requerimientos hídricos de la planta (Rebolledo y Romero, 2011; Whiley et al., 1988; Bower, 1988).

Diversos autores han destacado que la aplicación de agua suplementaria a través de riego en aguacate aumenta las producciones y mejora la calidad del fruto. Lahav y Kalmar (1983) mencionan que el aporte hídrico garantiza buen tamaño de fruta. Por otro lado, Silber et al. (2012) reportan que una adecuada frecuencia de riego es crucial para un óptimo desarrollo del fruto. Anguiano et al. (2007) mencionan que la disponibilidad de agua en ciertas regiones puede significar la diferencia entre la obtención de 6 t/ha o el ascenso a 12 t/ha e incluso puede ser mayor.

Es importante resaltar que la investigación en uso eficiente del recurso hídrico, además de definir la demanda de agua de los cultivos, debe ir acompañada de metodologías, como el uso de índices de eficiencia que permiten evaluar el manejo del riego y la productividad derivada de éste (Wolters y Bos, 1990; Smith, 2000). 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 sólo cuando sea necesaria, sin ocasionar reducciones en la productividad de los cultivos, mejorando de esta forma la economía del agricultor.

Este trabajo se desarrolló con el propósito de generar una alternativa de manejo eficiente del riego en el cultivo de aguacate Hass, mediante la aproximación a los requerimientos hídricos de la especie, en tres zonas productoras de Colombia, evaluando tres niveles de consumo hídrico basados en la evapotranspiración de referencia (ET_o), comparados con un testigo (sin riego), midiendo su efecto sobre la producción. A su vez, se midió la eficiencia de los tratamientos de riego aplicados, por medio de los indicadores eficiencia en el uso del agua (EUA), mediante la metodología planteada por (Perry *et al.*, 2009) y los indicadores de gestión del recurso hídrico suministro relativo de agua (Relative Water Supply -RWS- por sus siglas en inglés), suministro relativo de riego (Relative Irrigation Supply, RIS) y suministro relativo de agua por precipitaciones (Relative Rainfall Supply, RRS), basado en la metodología descrita por (Pérez *et al.*, 2009).

Los resultados mostraron que el tratamiento de riego equivalente al 0,75ET_o, obtuvo los valores de producción más destacados para las tres zonas de estudio, presentando diferencias significativas con los demás tratamientos en al menos uno de los ciclos evaluados. Además, los análisis mediante los indicadores demostraron que la alternativa de manejo más eficiente del riego fue el tratamiento 0,75ET_o, estimando que los requerimientos hídricos del cultivo en su etapa productiva, para las condiciones tropicales de Colombia, equivalen a un coeficiente del cultivo (K_c) igual a 0,75. Con los resultados de este proyecto se espera que los productores hagan uso de estas herramientas, para que a través de criterios técnicos, implementen un sistema de riego y tengan un manejo eficiente el recurso hídrico.

OBJETIVOS

Objetivo General

Generar una alternativa de manejo eficiente del riego en el cultivo de aguacate cv Hass para tres zonas productoras de Colombia en función de los requerimientos hídricos del cultivo

Objetivos Específicos

- Caracterizar edáfica y climáticamente las áreas de ubicación del estudio en Tolima, Antioquia y Cauca.
- Evaluar la productividad del aguacate Hass bajo diferentes regímenes de humedad del suelo durante dos ciclos productivos
- Definir el uso eficiente del agua en el cultivo de aguacate Hass en su etapa productiva mediante indicadores de gestión del recurso hídrico

1. REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 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 la región conocida como Mesoamérica (Williams, 1977). El consumo del aguacate era bien conocido por el hombre y la demostración más antigua de ello fue encontrado en una cueva en Coxcatlán, región de Tehuacán, Puebla, México, hallazgo que data entre los años 8.000- 7.000 a.C. (Smith, 1966). En el Códice Florentino se mencionan tres tipos de aguacate, que de acuerdo a su descripción; 'aoacatl' podría tratarse de *Persea americana* var. *drymifolia* (raza mexicana), 'tlacacolaocatl' a *Persea americana* var. *americana* (raza antillana) y 'quillaoacatl' a *Persea americana* var. *guatemalensis* (raza guatemalteca) (Barrientos y López-López, 1999).

El aguacate pertenece al género *Persea*, el cual a su vez se divide en dos subgéneros: *Persea* y *Eriodaphne* (Kopp, 1966). La especie *Persea 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: *Persea nubigena*, *Persea steyermarkii*, *Persea schiedeana*, *Persea floccosa* (Barrientos y López-López, 1999).

En 1935, Rudolph Hass, en Habra Heights (California), patentó la variedad Hass debido a la calidad de sus frutos, alto rendimiento y maduración tardía, comparado con otras variedades cultivadas en la época (Whiley *et al.*, 2002). Esta variedad pertenece a la raza guatemalteca *Persea nubigena* var. *guatemalensis* y se adapta a condiciones subtropicales, con temperaturas de 5 a 19 °C y alturas entre los 1.800 y 2.000 msnm

El aguacate Hass es la variedad más cultivada en el mundo, sus frutos son esféricos, ovalados, con corteza gruesa y quebradiza. La pulpa es suave, cremosa y excelente sabor; la semilla es pequeña (muy adherida a la cavidad seminal) y se pela fácilmente. Dependiendo del estado de madurez, presenta un color que va desde verde opaco (estados inmaduros) hasta morado oscuro (madurez de consumo) (Newett *et al.*, 2007). Los frutos son retenidos en la planta hasta por 6 meses posterior a su madurez fisiológica, sin pérdida marcada en la calidad (Bernal y Díaz, 2005).

El aguacate pertenece a la familia Lauraceae y en la actualidad el género *Persea* contiene alrededor de 85 especies, y la mayoría se encuentran desde el sur de los Estados Unidos de Norteamérica (*Persea borbonia*) hasta Chile (*Persea lingue*) (Barrientos y López-López, 1999).

1.2 Contexto General

Colombia a nivel mundial se encuentra ubicada en el cuarto lugar de producción de aguacate con 303.340 toneladas 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, 2009).

Las regiones productoras de aguacate más destacadas en Colombia son: Tolima con 8.088 ha, Eje cafetero con aproximadamente 6.443, Antioquia con 4.784 ha y Cauca donde existen 480 hectáreas y el área restante está distribuida en los departamentos del Bolívar, Cesar, Valle del Cauca y Santander (Agronet, 2014). El área sembrada en Colombia ha incrementado en los últimos años pasando de 7.000 ha en 1992 a 17.084 ha en el 2005 y de acuerdo con cifras del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, en el del 2014 el área se amplió a aproximadamente 33.340 ha.

1.3 Requerimientos Hídricos

La evaporación, la transpiración y la evapotranspiración son importantes el estimar los requisitos de riego y al programar el riego. Para determinar los requisitos de riego es necesario estimar la ET por medidas directamente en el campo o utilizando datos meteorológicos. Las medidas directamente en el campo son muy costosas y se utilizan mayormente para calibrar los métodos que estiman la ET utilizando datos de clima.

El concepto de evapotranspiración (ET), introduce al estudio de la demanda de agua por la atmósfera independientemente del tipo de planta, desarrollo y prácticas de manejo (Allen et al., 2006). Hay muchos factores que influyen en la magnitud de la evapotranspiración de un cultivo como el tipo de suelo, nivel de humedad, prácticas culturales y variedad dentro de cada cultivo; el conocimiento de la ET es un valor importante para el manejo del riego, por el ahorro de agua e incremento en el rendimiento de los cultivos; así mismo el principal factor para un riego eficiente es estimar con cierta exactitud la ET en un rango de más o menos un diez por ciento de los requerimientos de agua verdaderos lo cual es suficiente para el agricultor (Jiménez, 1992).

La evapotranspiración de referencia (ET_o) es uno de los parámetros más importantes para la determinación de los requerimientos hídricos de un cultivo. El término evapotranspiración de referencia (ET_o) fue introducido por Jensen *et al.* (1971), para referirse al límite superior o ET máxima que se presenta en un cultivo de alfalfa, con altura de 0.3 a 0,5 m, en una condición climática dada y con aproximadamente 100 m de extensión del área tampón. En adelante un amplio rango de ecuaciones han sido desarrolladas para estimar la ET_o a partir de datos meteorológicos. Sin embargo, Allent et al. (2006) reporta que el modelo más recomendado para estimar la ET_o es FAO Penman-Monteith. Este modelo requiere de mediciones simultáneas de variables climáticas como: Temperatura Máxima y Mínima ($^{\circ}C$), Humedad Relativa (%), Brillo solar (horas día y W/m^2) y Velocidad del viento (Km/h). Algunos investigadores han sugerido que la ecuación de Penman- Monteith puede ser utilizada para estimar directamente la evapotranspiración real del cultivo (ET_c) de distintos cultivos bajo diferentes condiciones atmosféricas (Abtew and Obeysekera, 1995; Ortíz, 1996).

El método FAO Penman-Monteith fue desarrollado haciendo uso de la definición del cultivo de referencia como un cultivo hipotético con una altura asumida de 0,12 m, con una resistencia superficial de 70 s m⁻¹ y un albedo de 0,23 y que representa a la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente, adecuadamente regado y libre de enfermedades. El método reduce las imprecisiones del método anterior de FAO Penman y produce globalmente valores más consistentes con datos reales de uso de agua de diversos cultivos. A continuación, se presenta la ecuación (1-1) que representa este método:

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

Donde:

ET_o evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹)

R_n radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹)

R_a radiación extraterrestre (mm día⁻¹)

G flujo del calor de suelo (MJ m⁻² día⁻¹)

T temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)

u₂ velocidad del viento a 2 m de altura (m s⁻¹)

e_s presión de vapor de saturación (kPa)

e_a presión real de vapor (kPa)

e_s - e_a déficit de presión de vapor (kPa)

Δ pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C⁻¹)

γ constante psicrométrica (kPa °C⁻¹)

La evapotranspiración del cultivo (ET_c) es la ET que presenta un cultivo, en cada etapa fenológica, desde su siembra hasta la cosecha, ocupando toda el área disponible, sin restricciones de humedad en el suelo. La relación dada entre la ET del cultivo y la ET_o se

conoce como coeficiente del cultivo, K_c (ecuación 1-2), y varía con el estado de desarrollo del cultivo:

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (1-2)$$

Los efectos de la transpiración del cultivo y la evaporación de agua del suelo, son combinados en un coeficiente del cultivo (K_c). Este coeficiente integra las características del cultivo y los efectos de la evaporación del suelo (Allen *et al*; 2006)

1.3.1 Requerimientos hídricos en aguacate

Teniendo en cuenta que el manejo del agua en un cultivo es un factor influyente en la producción, 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 ET_o , permite tener una aproximación real al coeficiente del cultivo (K_c) y por tanto a los requerimientos hídricos del cultivo.

En 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 ET_o ($K_c = 0,7$), mientras que en los tratamientos donde se aplicaron cantidades de agua mayores, equivalentes al 110% de ET_o ($K_c = 1,1$), los rendimientos disminuyen en aproximadamente un 50%. En Chile, Bozzolo (1993), basándose en un análisis de láminas aplicadas a dos huertos de aguacate Hass e información climática, estimó, para la zona de Quillota (Chile), coeficientes de cultivo cercanos a 0,5 en primavera; 0,65, en verano; y 0,55, hacia otoño. Por su parte, Cardemil (1999) también en Chile, sugiere coeficientes de 0,6 en julio y agosto; de 0,6 a 0,7, entre septiembre y noviembre; y de 0,8 a 0,9, en los meses de verano.

Tapia *et al.* (2007) determinaron para las condiciones de Michoacán, 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 y así mismo con las características de drenaje del suelo. Investigaciones desarrolladas por Anguiano *et al* (2007) en condiciones

subtropicales, para el caso en Michoacán, México, han destacado la importancia que el manejo del agua tiene en el cultivo del aguacate, argumentando que su disponibilidad en ciertas regiones, puede significar la diferencia entre la obtención de 6 t/ha de fruta y el ascenso a 12 t/ha o incluso más.

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.

1.4 Indicadores de uso eficiente del agua en la agricultura

Un indicador de uso eficiente del agua o gestión del riego se puede definir como una medida cuantitativa del comportamiento del riego. Permite realizar el seguimiento y valoración de la eficiencia y efectividad del riego (Alegre *et al.*, 2000).

En el estudio para optimizar los aportes de agua en relación con las demandas de distintos cultivos se han utilizado los indicadores Suministro Relativo de Agua (RWS, Relative Water Supply) y el Suministro Relativo de Agua de Riego (RIS, Relative Irrigation Supply) desarrollados por Levine (1982). Ambos indicadores aportan información sobre la condición de escasez o exceso de agua y de cómo se ajusta la aplicación de agua con la demanda (Molden *et al.*, 1998)

Suministro Relativo de Agua (Relative Water Supply, RWS)

El Suministro Relativo de Agua (RWS) muestra la relación entre el agua que entra al sistema (precipitación y riego) y el agua requerida (evapotranspiración del cultivo), indicando la relación entre la cantidad de agua disponible o utilizada y la cantidad de agua necesaria para la producción (Levine, 1982). El RWS permite realizar un estudio comparativo y de análisis en zonas donde se utilice riego con distintas características y da una idea de hasta qué punto se ven satisfechas las necesidades hídricas de los cultivos con el agua aportada con el riego y de forma natural (Rodríguez, 2004).

El RWS se calcula mediante la ecuación:

$$RWS = \frac{\text{aportes de agua}}{\text{necesidades del cultivo}} = \frac{R + Pe}{ET_c}$$

Donde R = riego; P = precipitaciones y ETc = evapotranspiración del cultivo.

Suministro Realtivo de Riego (Relative Irrigation Supply, RIS)

El Suministro Relativo de Agua de Riego (RIS) relaciona el volumen de agua usado en el riego, con el volumen de agua de riego necesario para evitar algún tipo de estrés a lo largo del ciclo de crecimiento del cultivo (Perry, 1996).

El RIS se calcula mediante la ecuación:

$$RIS = \frac{\text{aportes de agua de riego}}{\text{necesidad de riego del cultivo}} = \frac{R}{ET_c - Pe}$$

Donde R = riego; P = precipitaciones y ETc = evapotranspiración del cultivo

Suministro relativo de agua por precipitaciones (Relative Rainfall Supply, RRS)

El RRS solo tiene en cuenta los aportes de agua por lluvias y los requerimientos hídricos del cultivo. Este indicador se define mediante la siguiente ecuación:

$$RRS = \frac{\text{aportes de agua de precipitaciones}}{\text{necesidad de hídricas del cultivo}} = \frac{Pe}{ET_c}$$

Autores como Pérez *et al* (2009) indican que realizar un análisis utilizando indicadores de gestión del riego con RWS, RIS y RRS, permiten valorar ampliamente los aportes de agua, dado que permite relacionarlos con múltiples variables como clima, tipo de suelo y manejo

del riego. Además reportan que reforzar los indicadores con un balance hídrico se consigue verificar si la aplicación de agua a los cultivos supe los requerimientos del mismo.

El índice RWS permite analizar si la cantidad total de agua aportada, producto del riego y las precipitaciones, al cultivo durante un ciclo específico ha sido excesiva, suficiente o escasa (Rodríguez, 2002). Los valores que van de 0,9 a 1,2 se consideran adecuados. Con el indicador (RIS) se puede tener información sobre la eficiencia del riego aplicado al relacionar la cantidad de agua demandada con las necesidades netas de agua, y evidenciar si el agricultor incurre en aplicaciones adecuadas de agua. El valor óptimo del indicador estará en torno a 1, lo que significa que se satisfacen las necesidades hídricas no cubiertas con el agua de lluvia. Un valor por debajo de la unidad marcará un déficit de riego (Roldan *et al*; 2010). RRS permite establecer hasta donde las necesidades hídricas de los cultivos se satisfacen de manera natural. Cuando RWS y RRS son iguales no es necesario la aplicación de riego (Roldan *et al*; 2010).

Indicador de productividad del agua o uso eficiente del agua (EUA)

La productividad del agua o la eficiencia en el uso del agua 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 de agrícola, donde se requiere mayor producción de alimentos, con una menor cantidad de agua consumida por unidad productiva (Molden *et al.*, 2009).

De acuerdo con Perry *et al.*, 2009, este indicador, también llamado productividad del agua, 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 productividad del agua o EUA de un cultivo como la relación entre la cantidad de producción de biomasa y la cantidad de agua consumida para obtener dicha producción. Sin embargo, en la definición de productividad del agua, es importante ser específico en cuanto a lo que se indica como producto (biomasa o rendimiento) y consumo (transpiración o evapotranspiración). Por lo tanto, este indicador se puede expresar como:

$$EUA = \frac{\text{kg de biomasa}}{m^3 \text{ de agua transpirada}}$$

$$EUA = \frac{\text{kg de biomasa}}{m^3 \text{ de agua evapotranspirada}}$$

$$EUA = \frac{\text{Rendimiento del cultivo}}{m^3 \text{ de agua transpirada}}$$

$$EUA = \frac{\text{Rendimiento del cultivo}}{m^3 \text{ de agua evapotranspirada}}$$

La eficiencia en el uso del agua o productividad del agua (WP por sus siglas en inglés) en la agricultura ha sido aplicada por diversos autores para como Kiggundu et al. (2012) quienes para el cultivo de aguacate cv. Simmonds, obtuvieron un EUA entre 12,8 y 9,4, evaluando un Kc medio de 0,64, bajo las condiciones de Florida (USA). Del mismo modo Michelakis et al. (1997) en un cultivo de aguacate cv. Fuerte, en Creta (Grecia), obtuvo evaluando diferentes tipos de riego y Kc entre 0,97 y 0,4, un EUA entre 1,13 y 3,00 kg/mm (Kc=0,97). En Israel se han desarrollado varios trabajos sobre eficiencia en el uso del agua sobre el cultivar Hass, evaluando diversos valores de Kc (Steinhard, 1991; Lahav, 1992; Kurtz et al., 1992(Citados por Carr, 2013)).

2. METODOLOGÍA

El trabajo de tesis se desarrolló en el marco del programa de investigación financiado por COLCIENCIAS “Manejo integrado del cultivo del aguacate (*Persea americana*) var. Hass para incrementar la calidad y el rendimiento de las zonas productoras de Colombia” ejecutado por la Corporación Colombiana de investigación agropecuaria-CORPOICA.

2.1 Localización del experimento

El experimento se desarrolló en tres huertos ubicados en tres localidades, seleccionadas de acuerdo a su importancia en la producción de aguacate Hass en el país. Los huertos se seleccionaron en los municipios de: Rionegro (Antioquia), Morales (Cauca) y Herveo (Tolima). El criterio para la selección de las fincas se basó en la existencia de un área representativa del cultivo, mínimo una hectárea, donde se cuente con un historial del manejo agronómico, buen estado fitosanitario, variedad sobre la cual se soporta la investigación (Hass), con una edad mayor o igual a 6 años que garantice una producción estable.

En la localidad de Herveo-Tolima, el ensayo se instaló en la finca Los Arrayanes vereda Tesoritos, donde se encuentran sembrados 450 árboles de aguacate, de los cuales 180 cumplían con la edad mínima necesaria para el ensayo (6 años), distribuidos a una distancia de siembra de 9 m x 9 m, la altura a la que se encuentra es de 1.950 msnm. Topográficamente la pendiente es quebrada, el suelo tiene una textura al tacto franco arenosa, el agricultor presenta registros de análisis de suelos y tejido foliar con una periodicidad anual y en general el huerto se encontró en buen estado fitosanitario (Figura 2-1).



Figura 2-1. Lote experimental, finca Los Arrayanes. Herveo, Tolima [Tomada por L.Grajales]

En Rionegro-Antioquia el experimento se instaló en la finca La Escondida vereda Cabeceras, con un área aproximada de 4 hectáreas, seleccionando 36 individuos para el ensayo. Los árboles distribuidos a una distancia de 5x7 m con una edad de seis años, en buen estado fitosanitario. La finca se ubica a una altura 2100 msnm y se llevan registros históricos de cosecha, labores agronómicas y análisis de suelos con una periodicidad anual (Figura 2-2).



Figura 2-2. Lote experimental, finca La Escondida. Rionegro, Antioquia. [Tomada por L.Grajales]

En la localidad de Morales-Cauca, se instaló el experimento en la finca El Recuerdo, vereda El Pomo. La finca cuenta con 400 árboles de aguacate Hass, tomando para el ensayo 193 individuos que cumplen con el requisito de edad mínima del cultivo sembrados a una distancia de 5 m x 6 m, en buen estado fitosanitario, a una altura sobre el nivel del mar de 1.600 msnm, topográficamente la pendiente es suave que facilita las labores en campo. Se llevan registros históricos de cosecha, labores agronómicas y análisis de suelos con una periodicidad anual. La fuente hídrica más cercana es una quebrada, de la cual se podría conducir agua hasta el huerto y abastecer el sistema de riego (Figura 2-3).



Figura 2-3. Lote experimental, finca El Recuerdo. Morales-Cauca. [Tomada por L.Grajales]

2.2 Caracterización de las parcelas experimentales en las zonas de estudio

Se realizó una caracterización preliminar de las huertas experimentales como material de siembra, propagación, procedencia (vivero registrado) y cultivos en asocio; tomando información directamente en la finca y evaluando los registros realizados por los agricultores durante el desarrollo del cultivo. A su vez se definió una línea base de

producción y rendimiento en cada huerto, en base a datos recolectados por los agricultores y estadísticas nacionales de producción de aguacate.

En cada huerto donde se desarrolló el experimento se tomaron muestras de suelos para su análisis físico (textura, densidad aparente, densidad real, estabilidad de agregados, conductividad hidráulica, humedad volumétrica y curvas de retención de humedad) y químico (contenido de macro y microelementos, pH y conductividad eléctrica) determinados en laboratorio de suelos de CORPOICA. Los análisis físicos se hicieron solo al inicio del experimento y los químicos al inicio y final del ciclo productivo. Con esta información se identificó el estado nutricional del suelo y se ajustó un plan de fertilización para disminuir el efecto de éste factor en los resultados. En cuanto al análisis físico permitió identificar las propiedades físicas del suelo en las cuales se ha desarrollado la raíz. Todas las muestras se tomaron a profundidades de 0-15, 15-30 y 30-45 cm, siguiendo el procedimiento para toma de muestras de suelo, desarrollado por el laboratorio de suelos de CORPOICA.

Para la caracterización climática se obtuvo el historial de las estaciones más cercanas a las zonas, de las variables influyentes en el establecimiento de los ensayos como lo son: precipitación, evaporación, humedad relativa, radiación y velocidad del viento. Con esta información se realizó un análisis multianual de las variables climáticas, que permitió tener una aproximación al comportamiento de estos parámetros en el tiempo y establecer un punto de inicio en la aplicación de los tratamientos de riego.

Caracterización Hidrodinámica del suelo

Para caracterizar el movimiento del agua en el suelo se realizó en campo la prueba de bulbo húmedo utilizando el principio de la botella de Mariotte la cual mantiene el caudal constante, aun cuando el nivel de agua desciende. Es un recipiente (botella) con agua que tiene dos pequeños agujeros, uno lateral y uno inferior. El propósito de esta metodología es simular el funcionamiento de un gotero, para medir el bulbo húmedo y la profundidad a la que llega cierto volumen de agua por un tiempo determinado y así seleccionar el gotero requerido.

2.3 Aproximación a los requerimientos hídricos del aguacate en fase de producción

2.3.1 Descripción del experimento

Diseño experimental

Para evaluar el efecto de láminas de riego sobre la producción el cultivo de aguacate Hass se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar, teniendo tres bloques con tres repeticiones cada uno. La unidad experimental correspondió a tres árboles para cada tratamiento y cada repetición, evaluando en total 36 árboles por parcela ron.

Descripción de los tratamientos

Los tratamientos de riego se basaron en la evapotranspiración de referencia (ET_o), evaluándose tres regímenes de humedad y un tratamiento testigo (sin riego). A continuación se describen las láminas de riego aplicadas:

Tratamiento 1 (T1): Lámina de agua correspondiente al 50%ET_o

Tratamiento 2 (T2): Lámina de agua correspondiente al 75%ET_o

Tratamiento 3 (T3): Lámina de agua correspondiente al 100%ET_o

Tratamiento 4 (T4): Testigo (sin riego)

Para la selección de los árboles se tuvieron en cuenta las siguientes características: árboles con buen porte y vigor y que fueran de alta floración. En la figura 2-4, se muestra un esquema de la distribución de los árboles en los huertos seleccionados, de acuerdo al diseño experimental.

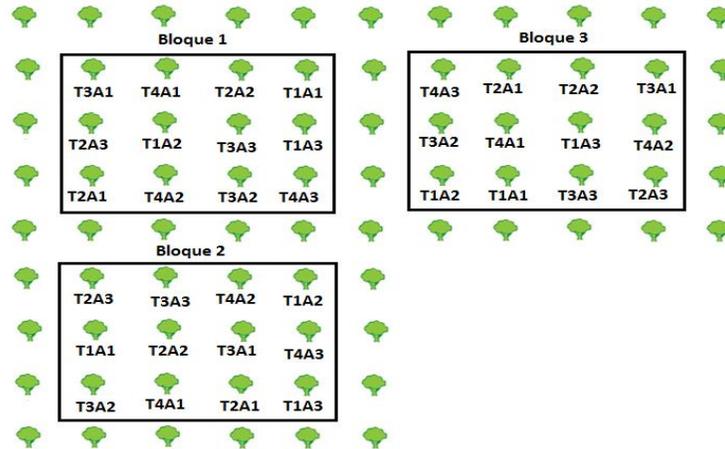


Figura 2-4. Esquema general de parcela experimental y distribución de árboles

2.3.2 Programación de riego e instalación de sistema de riego

Las láminas de riego evaluadas se aplicaron mediante la metodología de balance hídrico, herramienta que permite conocer la demanda hídrica de un cultivo y es similar a llevar una contabilidad del agua en el suelo donde se comparan las ganancias y las pérdidas de humedad. El suelo aumenta su contenido de humedad cuando ocurre un evento de precipitación (P) o cuando se le aporta agua por medio del riego (R). A nivel de campo, también ocurren ganancias de humedad por contribución del nivel freático (NF), escorrentía (Es) o flujo subsuperficial desde áreas cercanas. Las pérdidas de humedad del suelo son el agua que transpira el cultivo (T), el agua que se pierde por evaporación desde la superficie del suelo (Ev) y pérdidas por percolación profunda (Pp). El balance entre las ganancias y las pérdidas de humedad determina los cambios en el contenido de humedad del suelo (ΔHS) durante un período de tiempo especificado. Al expresar el balance en forma matemática se tiene la siguiente ecuación (2-1):

$$\Delta HS = (P + R + NF) - (Ev + T + Pp) \quad (2-1)$$

La evapotranspiración del cultivo (ETc) es la suma de la Evaporación (Ev) y la transpiración del cultivo (T) y en zonas donde el nivel freático está profundo y asumiendo que no existe percolación profunda, la ecuación anterior, se puede simplificar a la siguiente expresión (ecuación 2-2).

$$\Delta HS = P + R - ET_c \quad (2-2)$$

El contenido de humedad del suelo y los otros parámetros incluidos en la ecuación del balance hídrico, generalmente se expresan en términos de la lámina de agua (Torres, et al., 1996). Como la evapotranspiración del cultivo ET_c se entiende como la ET que presenta un cultivo desde su siembra hasta la cosecha, ocupando toda el área disponible, sin restricciones de humedad en el suelo. Se determina mediante la ecuación (2-3):

$$ET_c = K_c \times ET_o \quad (2-3)$$

Donde:

K_c : Coeficiente del cultivo o uso consuntivo del cultivo el cual varía en cada etapa fenológica del cultivo (No se conoce para aguacate Hass, en condiciones de campo para Colombia).

ET_o : evapotranspiración de referencia (mm/día)

La ET_o se estimó mediante el software libre desarrollado por la FAO, ET_o Calculator 3.1, que se basa en el modelo de FAO Penman-Monteith, reportado como el modelo más recomendado para estimar la ET_o (Allen *et al.*, 2006), descrito en la revisión de literatura. Este modelo requiere de mediciones simultáneas de variables climáticas como: Temperatura máxima y mínima ($^{\circ}C$), humedad relativa (%), brillo solar o radiación solar (horas día ó W/m^2) y velocidad del viento (m/s). Por lo cual se requirió de datos diarios de las diferentes variables atmosféricas, por ello se instalaron estaciones climáticas automatizadas (EMA), utilizando como superficie de referencia césped podado con riego constante, para el registro de éstas y así calcular diariamente la ET_o y ajustar los tratamientos a la demanda hídrica atmosférica diaria. También se instalaron tanques evaporímetros clase A con el fin de tener un respaldo para la determinación de ET_o , y pluviómetros para el registro de la precipitación. La precipitación efectiva se determinó con el software libre desarrollado por la FAO CROPWAT 8.0, utilizando el método de Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (USDA Soil Conservation Service Method)

Las estaciones fueron instaladas en un soporte a una altura del suelo de 2 m, los pluviómetros se instalaron a una altura de 1 m y los tanques a 25 cm del suelo. Se ubicaron en una zona despejada del huerto donde no hubiera barreras que alteren las mediciones. Los elementos nombrados se instalaron de acuerdo con los estándares propuestos por la FAO en su serie de publicaciones No. 56 (Allen *et al.*, 2006). En la figura 2-5, se muestra los implementos instalados en campo.



Figura 2-5. Instalación de tanque evaporímetro y estación meteorológica en zonas de ejecución. [Tomadas por D.Dorado]

El balance hídrico se realizó con una hoja de cálculo (Anexo 1) construida para el experimento, cuya salida o respuesta es la lámina diaria a aplicar expresada en milímetros, volumen de riego definido litros y el tiempo de apertura de cada válvula según el porcentaje de ETo, o tiempo de riego dado en minutos. En la figura 2-6 se muestra un resumen de la metodología de balance hídrico aplicada en la programación de riego.

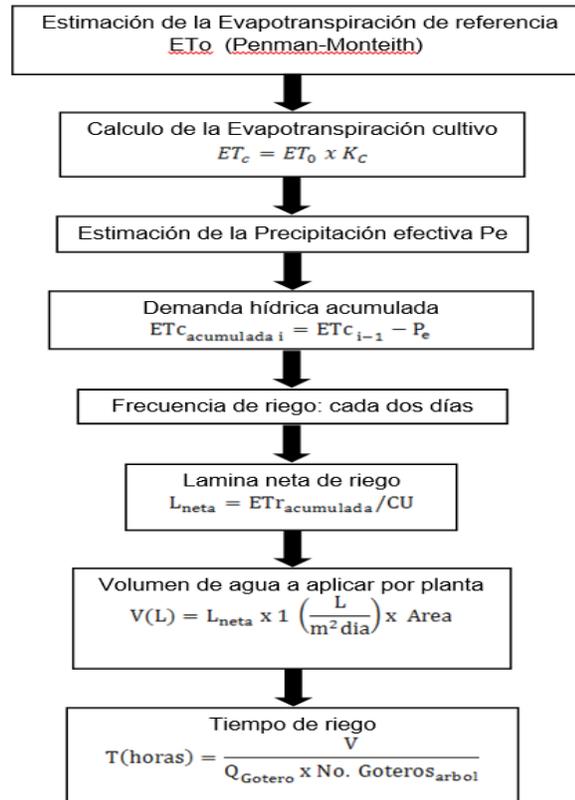


Figura 2-6. Esquema metodológico para la implementación del balance hídrico. [Allen et al., 2006]

Sistema de riego

La aplicación de las láminas de riego se hizo mediante un sistema de riego localizado de alta frecuencia, en este caso riego por goteo, seleccionado de acuerdo a las condiciones hidrofísicas de los suelos de los huertos donde se establecieron los ensayos. Se utilizaron los mismos materiales y las mismas características de diseño. En las tres localidades, se utilizó manguera de polietileno virgen de dos pulgadas de diámetro, como tubería de conducción principal que lleva el agua desde la fuente hasta la parcela experimental. El riego es distribuido en tres ramales secundarios, de los cuales se controló los tratamientos de riego, mediante válvulas de cierre lento activadas manualmente al momento de la aplicación de las láminas. Para este sistema de distribución se usó manguera de polietileno virgen de una pulgada y a partir de ésta se instalaron mangueras del mismo material de 16 mm de diámetro con la cual se llevó el agua a los árboles correspondientes. También

se instalaron válvulas de reducción de presión en línea, puesto que la topografía en general para todas las zonas, es de pendiente alta y podría provocar que la presión en las líneas secundarias aumentara ocasionando averías en el sistema. Además, se utilizaron goteros autocompensados con tecnología antidrenante, para evitar que los cambios de presión generados en el sistema influyeran sobre el caudal a descargar de cada gotero que es de 8 l/h. En cada árbol se instalaron dos anillos cada uno con 10 goteros, distanciados a 1 m y 1,4 m del tronco y un distanciamiento entre goteros de 60 cm y 80 cm respectivamente. El área humedecida por los goteros correspondió a 4 m² del área que cubre la copa del árbol. En la figura 2-7 se muestra un esquema de la zona humedecida por el tipo de riego instalado.

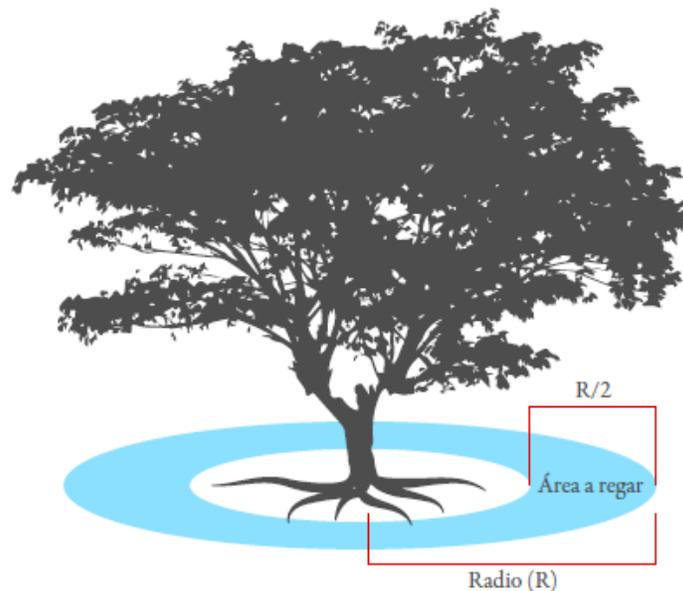


Figura 2-7. Esquema del área humedecida por el sistema de riego instalado. [Dorado et al., 2017]

En las tres localidades se utilizaron como fuente hídrica cuerpos superficiales de agua (quebradas) las cuales durante el período de evaluación mantuvieron caudales de oferta suficientes para la aplicación de los tratamientos. En Herveo el agua fue tomada de un nacimiento en la parte más alta de la finca y esta fue conducida hasta el lote por medio de manguera de polietileno de una pulgada y almacenada en un tanque de 2.000 L. En Morales la fuente hídrica fue la quebrada El Pomo ubicada en la parte baja de la finca y el

agua era conducida hasta el lote por bombeo hasta un tanque de plástico de 10.000 l dispuesto por el agricultor para las labores de riego. En Rionegro se utilizó un nacimiento de agua localizado en la parte más alta de la finca y al igual que en Herveo está era conducida hasta el lote por gravedad a través de mangueras conectadas de una pulgada.

Como fuente de potencia se utilizaron electrobombas marca Pedrollo de 1,5 HP, con altura nominal máxima de 42 m y caudal nominal de 120 l/min, en los municipios de Rionegro y Morales. En la localidad de Herveo, al tener un gradiente de altura mayor entre la fuente de agua y el lote experimental se aprovechó la energía generada por la pendiente para impulsar el agua, almacenada en un tanque de 2000 l, hacia los emisores de riego. En la figura 2-8, se muestra el detalle de la instalación del sistema de riego en las tres localidades.



Figura 2-8. Instalación de sistema de riego en las zonas de ejecución. [Dorado et al., 2017]

2.3.3 Variables de respuesta

Las variables evaluadas como respuesta a los tratamientos de riego fueron: producción por planta, rendimiento y crecimiento de fruto. A continuación, se describe la metodología para determinar cada una de estas variables:

➤ Producción y rendimiento

El fruto al alcanzar su madurez fisiológica fue cosechado manualmente, teniendo en cuenta las unidades experimentales correspondientes a cada tratamiento de riego. Dentro de las variables de cosecha se midió el número de frutos por planta y peso total de los frutos (kg/planta) medido con una balanza analítica marca Accuweigh con un rango máximo de 30 kg. El rendimiento se determinó t/ha.tratamiento, teniendo en cuenta la densidad de siembra de cada localidad.

2.4 Indicadores de sostenibilidad ambiental o de gestión del recurso hídrico

Se implementó una metodología para la aplicación de los indicadores de suministro relativo de agua (RWS por sus siglas en inglés), suministro relativo de riego (RIS) y suministro relativo de agua de lluvia (RRS). Estos indicadores relacionan los aportes de agua y las necesidades hídricas de los cultivos. Las variables requeridas para su evaluación son: el agua aplicada mediante riego al cultivo, la precipitación efectiva y los requerimientos hídricos del cultivo (ET_c).

De acuerdo con algunos autores (Roldan et al., 2010; Pérez *et al.*, 2009) para tener datos comparativos es mejor evaluar los indicadores semanal o mensualmente y de esta forma establecer relaciones entre la oferta y la demanda hídrica de cada región. Para el caso las evaluaciones se realizaron mensualmente, calculando los indicadores con las ecuaciones (2-4; 2-5 y 2-6) descrita por los autores mencionados.

$$RWS_{mes} = \frac{\sum_{i=30}^{i=d} R_i + \sum_{i=30}^{i=d} Pe_i}{\sum_{i=30}^{i=d} ET_{ci}} \quad (2-4)$$

$$RIS_{mes} = \frac{\sum_{i=30}^{i=d} R_i}{\sum_{i=30}^{i=d} Pe_i - \sum_{i=30}^{i=d} ET_{ci}} \quad (2-5)$$

$$RRS_{mes} = \frac{\sum_{i=30}^{i=d} Pe_i}{\sum_{i=30}^{i=d} ET_{ci}} \quad (2-6)$$

También se evaluó el uso eficiente del agua mediante el indicador EUA que relaciona la producción de biomasa y la cantidad de agua utilizada. Para el caso de este estudio la biomasa fueron los frutos cosechados al final del ciclo productivo. En este sentido la medición se realizó al finalizar el ciclo, donde se obtuvo los datos de cosecha y se relacionó la producción y el volumen total de agua aplicado durante todo el ciclo (ETc), por cada tratamiento. La expresión con la cual se definió este indicador es (ecuación 2-7):

$$EUA = \frac{\text{Rendimiento por tratamiento}}{\text{Volumén de agua aplicado}} = \frac{\text{kg / ha}}{\text{m}^3} \quad (2-7)$$

2.5 Análisis Estadístico

Con el fin de comparar la influencia de las diferentes láminas de riego sobre la variable respuesta e indicadores evaluados, se realizó un análisis de varianza con un nivel de significancia del 5%. Para contrastar los promedios de tratamiento se utilizó la prueba de Tukey. Para determinar los supuestos de normalidad y homocedasticidad se usó el método de Shapiro-Wilk. Por cada ciclo se calculó los indicadores, los cuales se contrastaron

cuantitativamente con los tratamientos. Se utilizó la versión 9.4 del software Statistical Analysis System "SAS".

2.6 Análisis de costos

Para este estudio se aplicó el método Costo/Eficiencia (C/E), el cual se aplica en evaluación de alternativas de proyectos, (en este caso alternativas de manejo sostenible del riego en el cultivo del aguacate Hass), en los cuales la cuantificación de los beneficios es compleja y se admite que las alternativas proporcionan el mismo o similar beneficio (mejora en la producción, medida en número de frutos y calidad).

Con el propósito de determinar la eficiencia se estimó el Valor Presente Neto (VPN) de los beneficios y de los costos totales. Para ello se determinó el número de periodos de tiempo durante los cuales se percibieron beneficios y durante los que se incurrió en costos. Adicionalmente, se definió una tasa de descuento (r) para lo cual se tuvo en cuenta la tasa de interés real del capital proporcionado por el Banco Mundial, que para Colombia en el 2014 fue de 8,9%.

Mediante la ecuación 2-8, se calculó el valor presente neto de los beneficios totales, en este caso definido como ingresos brutos o totales.

$$VPN (IT) = \sum_{t=1}^T \frac{Ingresos\ Totales}{(1+r)^t} \quad (2-8)$$

Para estimar el valor presente neto de los costos totales del proyecto se procedió de la misma manera, aplicando la ecuación 2-9.

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).

$$VP (IN) = VPN (IT)_t - VPN (CT)_t > 0 \quad (2-9)$$

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

En la tabla 2-1, se describe las variables escogidas para la evaluación de cada alternativa y cálculo de VPN.

Tabla 2-1. Variables para evaluación económica

ITEM	DESCRIPCIÓN
IT (Ingresos Totales) = Numero de frutos * precio de mercado	<ul style="list-style-type: none"> - Numero de frutos por alternativa aplicada. - Precio del fruto en el mercado
CT (Costo Total) = (costos de instalación) + (costos fijos) + (costos variables) + (otros costos)	<ul style="list-style-type: none"> - Costos fijos = aquellos que son independientes al nivel de producción, teniendo en cuenta el periodo de amortización. (maquinaria y mejoras, gastos de estructura) - Costos Variables = uso de insumo 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 tiene en cuenta los costos de mano de obra en el terreno), Manejo de plagas y enfermedades (insumos aplicados, cantidad y precio)

Fuente: Dorado et al., 2017

3. RESULTADOS

3.1 Caracterización general de las parcelas de estudio

A partir de la selección se realizó una caracterización del estado cero de las plantaciones como línea base para la aplicación de los tratamientos y comparar los efectos de éstos sobre el rendimiento de los árboles. En la tabla 3-1 se muestra las características generales de las parcelas donde se establecieron los ensayos.

Tabla 3-1. Características generales de las parcelas de estudio

CARACTERIZACIÓN	MORALES	HERVEO	RIONEGRO
Departamento	Cauca	Tolima	Antioquia
Vereda	Carpintero	Tesoritos	Cabeceras
Ubicación Geográfica	W 76° 37' 15.8" N 02° 48' 34.5"	W 75° 12' 10,5" N 05° 02' 44.6"	W 75° 24' 14,7" N 06° 05' 56,9"
Altitud (m. s. n. m)	1.600	1.943	2.169
Temperatura media (°C)	19,0	15,1	17,1
Precipitación media (mm/año)	1.800	2.908	1.990
Evaporación media (mm/año)	1.150	851	1.210
Brillo solar (horas/día)	4,0	2,2	5,0
Humedad relativa (%)	80,2	88,0	76,9
Nombre de la finca	El Recuerdo	Los Arrayanes	La Escondida
Área de la finca (ha)	4	3	14
Edad de cultivo (años)	6	6	6
Riego de la Finca	Mateo	Ninguno	Ninguno

Fuente: Modificado de Dorado et al., 2017

Se obtuvo también una caracterización preliminar del comportamiento productivo del cultivo en cada zona, definiendo las principales etapas fenológicas en los meses que tiene lugar un ciclo de producción de aguacate Hass. En la figura 3-1 se muestra un calendario fenológico del cultivo para cada zona de estudio.

Herveo												
Etapa fenológica	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Floración												
Formación y cuajado de fruto												
Cosecha												
Rionegro												
Etapa fenológica	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Floración												
Formación y cuajado de fruto												
Cosecha												
Morales												
Etapa fenológica	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Floración												
Formación y cuajado de fruto												
Cosecha												

Figura 3-1. Calendario fenológico de aguacate Hass en las tres zonas de estudio.

Como resultado de la caracterización inicial de la producción se presentan en la tabla 3-2, los registros de cosecha que se tienen para las tres localidades. En Herveo se obtuvo un rendimiento inicial promedio de 7,5 t/ha, cifra menor al rendimiento promedio para la zona de 8,1 t/ha (Agronet, 2014). En Morales el rendimiento inicial fue de 7,6 t/ha superando el promedio reportado para Cauca de 6,6 t/ha (Agronet, 2014). En Rionegro se presentó un rendimiento promedio de 12,8 t/ha mayor al promedio nacional para esta región de 9,9 t/ha.

Tabla 3-2. Registro de inicial de cosecha. 2013

Localidad	Peso fruto (g)	No. Frutos/árbol	Producción (kg/árbol)	Rendimiento (t/ha)
Herveo	181,6	242,0	61,3	7,5
Morales	127,0	187,0	26,6	7,6
Rionegro	207,4	419,0	81,7	12,8

Fuente: Modificado de Dorado et al., 2017

3.1.1 Caracterización climática

Herveo

El huerto de aguacate Hass en el municipio de Herveo se localiza en La finca Los Arrayanes ubicada a W 75° 12' 10.5" y N 5° 02' 44.6", a 1.943 msnm, en una región climática templada Húmeda según el esquema de ordenamiento territorial del municipio. Para realizar la caracterización climática de la zona se tomó información climática de la estación El Cedral del IDEAM, localizada en el municipio de Pereira a 2.120 msnm dentro de la zona de influencia del Nevado del Ruiz y con series de datos de más de 10 años. La ubicación de la estación es N 4° 42' y W 75° 32'.

La temperatura promedio de la zona donde se ubica el experimento es 15,1 °C, la temperatura máxima 20,0 °C y la temperatura mínima 10,1 °C. La humedad relativa en promedio es de 88,0%, mientras que el brillo solar presenta una media anual de 2,2 horas/día.

De acuerdo con el análisis climático, esta zona se presenta una precipitación promedio anual de 2.908 mm y una evaporación promedio anual de 851 mm, es decir, que el balance hídrico anual es positivo, sin embargo, las lluvias no se distribuyen uniformemente presentándose meses con déficit hídrico donde el cultivo necesita riego, tal como se muestra en la figura 3-2, donde se compara la precipitación con la ETo. mensual. Los meses donde es necesario aplicar riego en esta localidad son julio, agosto y septiembre. Con estos registros la región donde se ubica el huerto se clasifica como bosque muy húmedo premontano (bmh-PM) según la clasificación de zonas de vida de Holdridge (1967)

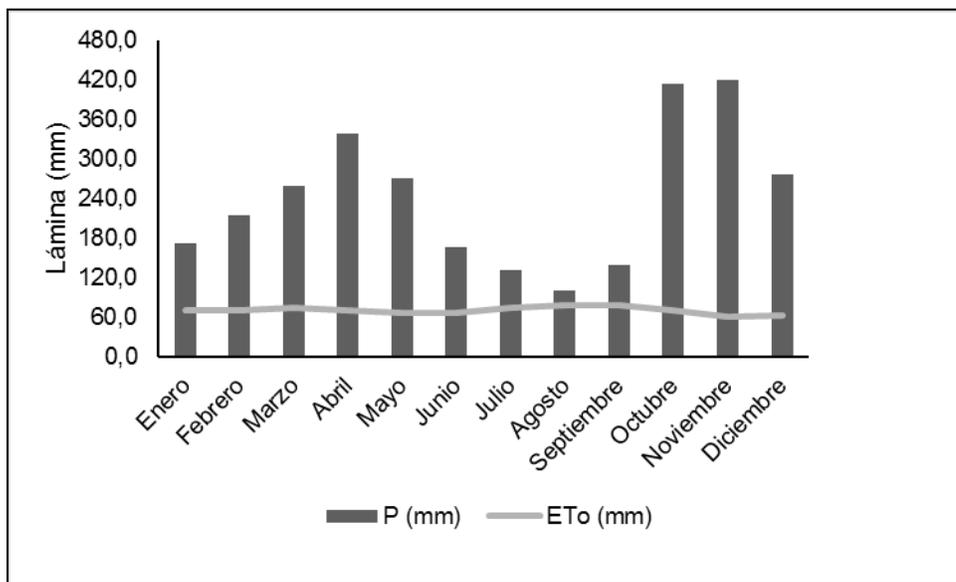


Figura 3-2. Balance hídrico multianual Herveo, Tolima. (Modificado de Dorado et al., 2017)

Durante el desarrollo del experimento se instaló una estación meteorológica automatizada (EMA) con el fin de realizar el seguimiento a las variables climáticas que intervienen en el cálculo de la ETo y así ajustar las láminas de riego.

El balance hídrico en la zona de estudio muestra un comportamiento similar al obtenido del análisis climático, tal y como se observa en la figura 3-3, con los datos tomados en el huerto el balance es positivo prácticamente todo el año, sin embargo, en los meses de julio y agosto el déficit hídrico es bastante notable. Cabe resaltar que para ese período el IDEAM (2015b) reportó la ocurrencia del fenómeno de EL NIÑO en gran parte del país.

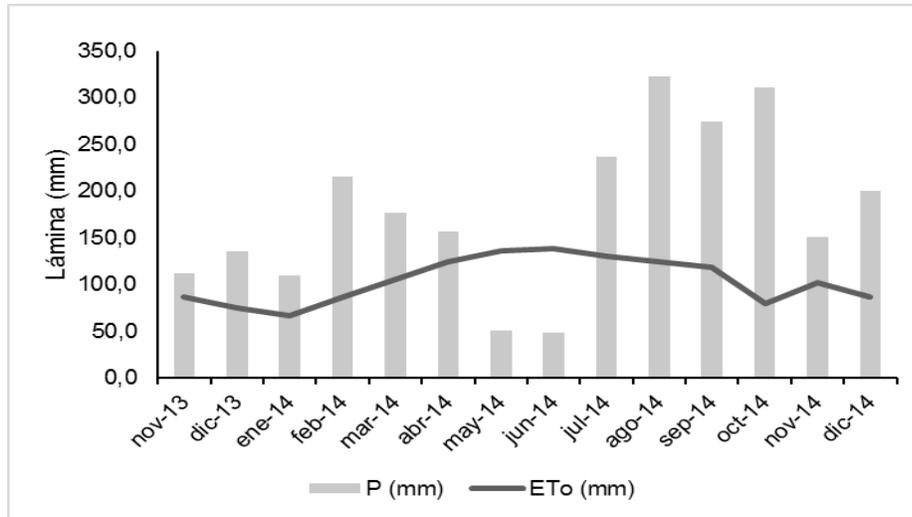


Figura 3-3. Balance hídrico realizado en el huerto experimental Finca Los Arrayanes, durante el período 2013-2015. (Modificado de Dorado et al., 2017)

Rionegro

En Rionegro (Antioquia) el experimento se localiza en la finca La Escondida a una altura de 2.172 msnm. Los registros para el análisis climático de la zona fueron tomados de la serie climática de la estación principal del IDEAM del Centro de Investigación CORPOICA La Selva, ubicada en el municipio de Rionegro a 2.120 msnm. La ubicación geográfica de la estación es N 6° 08' y W 75° 25'.

Según el análisis realizado la precipitación media multianual en la zona es 1.990 mm/año y la evaporación media anual es de 1210 mm/año, lo que indica que el balance hídrico anual es positivo, pero las lluvias no se distribuyen uniformemente presentándose meses con déficit hídrico (diciembre, enero, febrero) donde se hace necesario suplir ese requerimiento, tal como se muestra en la figura 3-4.

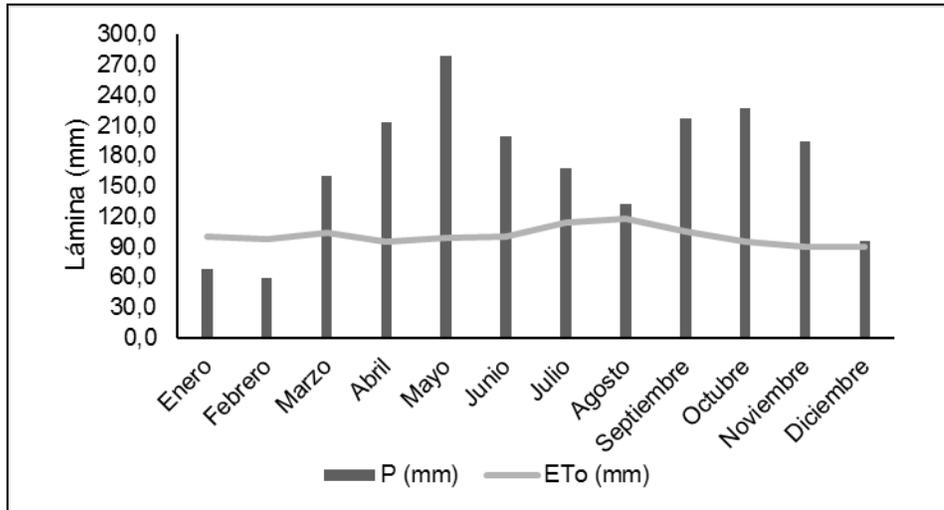


Figura 3-4. Balance hídrico multianual, Rionegro (Antioquia). (Modificado de Dorado et al., 2017)

La temperatura media es 17,1 °C, la temperatura máxima 22,0 °C y la temperatura mínima 12,0 °C. La humedad relativa presenta un promedio anual de 76,9% y el brillo solar un promedio anual de 5,0 horas/día. Con la información obtenida la zona donde se encuentra establecida la parcela de estudio se clasifica como bosque húmedo premontano (bh-PM) según la clasificación de zonas de vida de Holdridge (1967).

Al igual que en las otras zonas de estudio, para ajustar el cálculo de la evapotranspiración de referencia y el comportamiento de las variables climáticas que influyen en ella, se instaló una estación climática automatizada en el huerto, para registrar esta información.

Con los registros tomados en la EMA instalada en el huerto, se corroboró que el régimen hídrico en la zona de estudio es positivo durante casi todo el año. El período de déficit se presenta en los meses de enero, febrero y marzo (figura 3-4), siendo enero el mes más seco del año, tal y como se evidenció en el balance hídrico multianual (figura 3-5).

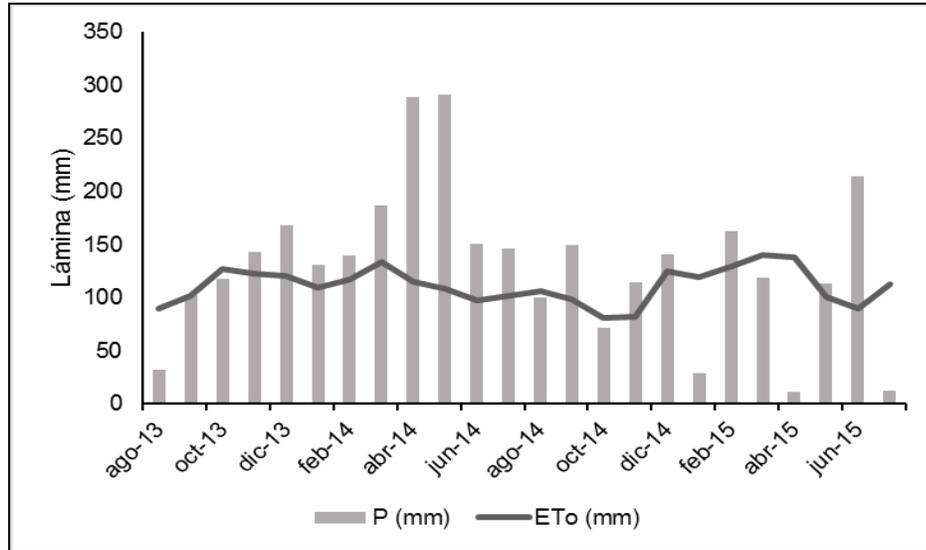


Figura 3-5. Balance hídrico realizado en el huerto experimental Finca La Escondida, durante el período 2013-2016. (Modificado de Dorado et al., 2017)

Morales

En Morales (Cauca) el experimento se encuentra en la finca El Recuerdo ubicada geográficamente W 76° 37' 15.8" y N 2° 48' 34.5", a una altura de 1.600 msnm en un piso térmico altitudinal húmedo templado según el esquema de ordenamiento territorial del municipio (2002). Los registros para el análisis climático de la zona fueron tomados de la serie climática de la estación principal La Trinidad, perteneciente a CENICAFE. Está ubicada en el municipio de Piendamó a 1.671 msnm.

La precipitación promedio anual es de 1.800 mm y la evaporación anual es de 1.150 mm, en la zona, por lo cual se puede decir que el balance hídrico anual es positivo, pero al igual que las demás localidades, las lluvias no se distribuyen uniformemente presentándose una temporada de déficit hídrico que corresponde a los meses de junio, julio, agosto y septiembre donde es importante la aplicación de agua por medio de riego, tal como se muestra en la figura 3-6. La temperatura media es 19,0 °C, la temperatura máxima 24,3 °C y la temperatura mínima 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 ente 3,1 y 5,1 h, el promedio anual es de 4,1 horas/día. Al igual que las demás zonas esta se clasifica como bosque húmedo premontano (bh-PM).

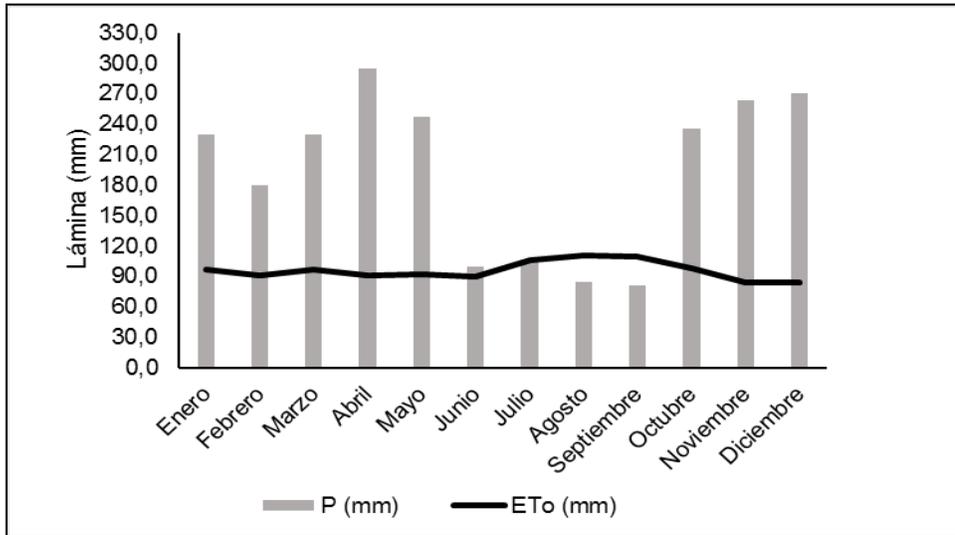


Figura 3-6. Balance hídrico multianual, Morales (Cauca). (Modificado de Dorado et al., 2017)

Durante el mismo período evaluado en las tres zonas, en Morales se observa un comportamiento del régimen hídrico muy similar al mostrado en el análisis multianual (Figura 3-7). Tal como se mencionó anteriormente, con los datos registrados por la EMA instalada en el huerto, se evidencia que los meses de déficit son junio-julio-agosto-septiembre, lo que implica que durante ese período se debe contar con riego para suplir los requerimientos hídricos del cultivo.

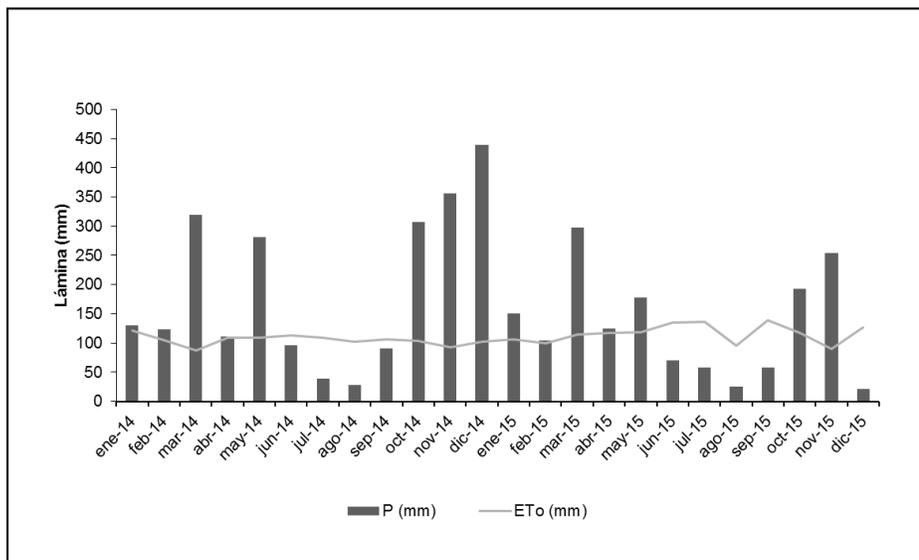


Figura 3-7. Balance hídrico realizado en el huerto experimental Finca El Recuerdo, durante el período 2013-2015. (Modificado de Dorado et al., 2017)

Como se puede observar las tres zonas presentan regímenes de lluvia con precipitaciones medias anuales entre los 1200 y 2000 mm/año, rango sugerido por Bartoli (2008) como adecuado para el cultivo de aguacate Hass. Sin embargo, la distribución de las lluvias es bimodal, por lo tanto, durante una época del año hay un período seco o de bajas precipitaciones, tal y como se observa en el análisis multianual y los registros tomados entre 2014-2015. Esto indica que durante los períodos secos que en Herveo es entre julio-agosto (formación de frutos), Rionegro entre diciembre-febrero (cosecha y floración) y en Morales entre julio-septiembre (floración y formación de frutos), de acuerdo con el calendario fenológico; se requiere aportar agua al cultivo por medio del riego.

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 cual durante los períodos secos que a su vez coincide con las etapas fenológicas de floración y cuajado de fruto (Figura 3-1), donde se debe garantizar que haya suficiente humedad en el suelo para evitar que la planta se estrese. De acuerdo con Cossio-Vargas *et al* (2008) el éxito del cultivo de aguacate en la zona de Tepic (México) donde se cultiva sin riego se debe al material del subsuelo (2 a 40 m) que es llamado "Xal" que retiene suficiente humedad y la época seca la suministra a la capa de suelo superficial. Pero en las zonas donde se desarrolla la investigación (Herveo-Rionegro-Morales) los suelos de origen volcánico y retienen buena humedad, pero también poseen una alta velocidad de infiltración lo que hace 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.

3.1.2 Caracterización Edáfica

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, las cuales 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 Hapludans* y *Hydric Hapludans*, 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, pendientes largas y empinadas (IGAC, 2008a)

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 por el material parental del cual se origina este suelo, lo que a su vez ocasiona la acidez del mismo. A estos valores de pH se inhibe la solubilidad de Fósforo (P), 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, 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).

Se presentan contenidos altos de zinc (Zn) y materia orgánica, contenidos normales de K, Ca, Cu y boro (B), bajos contenidos de Mg, azufre (S) y manganeso (Mn). La 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), pero debido al pH y altos contenidos de materia orgánica, no hay riesgo de salinidad y el contenido de sodio (Na) es menor a 1 Cmol/kg, por lo tanto, no hay riesgos de sodicidad. En el anexo 2, se encuentran relacionados los resultados de los análisis de suelos realizados en el laboratorio de suelos de CORPOICA.

Física del suelo. Se realizó una calicata en el lote, de esta se observó que el horizonte A tiene una profundidad aproximada de 35 cm, presenta un alto contenido de materia orgánica, textura al tacto franco arenosa, indicando una alta porosidad. Profundizando en el perfil se notó un horizonte de transición A1, en cual se evidenció presencia de materia orgánica procedente del primer perfil que por el movimiento del agua se va trasladando en profundidad. También hay concentración iluvial de arcillas en profundidad (mayor a 50 cm), lo que disminuye la porosidad disminuyendo la velocidad con la que el agua se mueve en el suelo, ocasionando una mayor retención de humedad (figura 3-8).

De acuerdo con los resultados obtenidos de las muestras tomadas, el suelo donde se encuentra el huerto experimental, es de textura franco arenosa (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 indicando que el suelo tiene una alta macroporosidad y permeabilidad, propiciado por los altos contenidos de materia orgánica. Los valores de porosidad total son superiores a 40%, considerándose muy alta, lo que favorece la relación aire/agua en la zona de raíces de aguacate Hass. En la tabla 3-3 se muestra los resultados de las principales propiedades físicas de suelos.

Tabla 3-3. Resultados de los análisis físicos. 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

Fuente: (Modificado de Dorado et al., 2017)

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 pertenece a la Asociación Guadua (GDd1)

conformada principalmente por suelos *Typic Hapludans*. 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, cóncavas en las partes inferiores, entre 7-25%. (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 aumenta la probabilidad que el Aluminio 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 proporciona una mayor estabilidad del suelo y mejora la actividad microbiana, contenidos normales de K, Cu y Zn; niveles bajos de P ocasionados posiblemente por la capacidad fijadora de la alófana, mineral propio de suelos originados de cenizas de 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 2,83 Cmol/kg es considerada muy baja, por lo cual 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 anteriormente es una de las principales limitantes del cultivo. En general este suelo presenta bajos niveles de disponibilidad de nutrientes. En el anexo 3, se encuentran relacionados los resultados de los análisis de suelos realizados en el laboratorio de suelos de CORPOICA.

Física del suelo. En el perfil realizado (figura 3-8) se evidenció una capa orgánica en los primeros 20 cm, una textura al tacto franco arenosa, lo que implica una alta porosidad. Después de los 25 cm se evidencia un perfil de color parda oscura, de textura franca con un poco más de arcilla y menor contenido de materia orgánica, por lo cual 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 franca arenosa (FA), la densidad

aparente fue menor a 0.9 g/cm^3 cualidad propia de suelos andicos. La porosidad total es muy alta, favoreciendo los procesos de drenaje, movimiento de agua en suelo y una mejor relación aire/agua en la zona de raíces de la planta. En la tabla 3-4, se muestra los principales resultados del análisis físico de suelos.

Tabla 3-4. Resultados de análisis físico de suelos. 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: (Modificado de Dorado et al., 2017)

Morales

Al igual que las otras dos zonas los suelos de localidad de Morales, presenta propiedades de suelos andicos 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 (2008b) 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, texturas moderadamente gruesas a moderadamente finas y finas, fuerte a moderadamente ácidos, alta saturación de aluminio y fertilidad natural 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 y por consiguiente la nitrificación de la materia orgánica se ve afectada. La asimilación del fósforo (P) disminuye por formarse combinaciones insolubles de este elemento con el hierro (Fe) y con el aluminio (Al). De acuerdo con Casierra-Posada y Aguilar-Avenidaño (2007) a 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 aluminio intercambiable por encima de 15% afecta el rendimiento.

El contenido de materia orgánica es alto de 0-30 cm de profundidad del suelo y normal de 30-45 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 éste forma complejos no tóxicos con los compuestos húmicos Casierra-Posada y Aguilar-Avendaño (2007). Los niveles de elementos menores como Fe y Cu son altos en todo el perfil, se presentan en general contenidos normales de K y contenidos bajos de los demás nutrientes asociados al análisis. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es 4,08 Cmol/kg de 0-15 cm y disminuye hasta 1,13 Cmol/kg a los 45 cm, es considerada baja, 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, la cual 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, propio de este tipo de suelos. Las acciones correctivas para mejorar tales condiciones son 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). En el anexo 4, se encuentran relacionados los resultados de los análisis de suelos realizados en el laboratorio de suelos de CORPOICA.

Física del suelo. Se realizó una calicata en el huerto, encontrando que el primer horizonte (A) con una profundidad de 30 cm, presenta un alto contenido de materia orgánica, textura al tacto franco-arenosa, 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 franco arcillosa, disminuyendo la capacidad de drenaje interno y movimiento del agua en el suelo. En la figura 3-8, se observa el perfil realizado en campo.

Los resultados obtenidos, mostraron que la textura del suelo va de Franca a areno francosa 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. A continuación, en la tabla 3-5 se muestran los resultados de los análisis físicos.

Tabla 3-5. 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

Fuente: (Modificado de Dorado et al., 2017)



Figura 3-8. Perfiles de suelo en cada localidad, de izquierda a derecha: A. Morales, B. Herveo, Rionegro (C. suelo con capa orgánica y D. suelo sin capa orgánica). Tomadas por Dorado, D.

3.2 Aproximación a los requerimientos hídricos del cultivo

La cantidad de agua expresada en la lámina y volumen aplicados por árbol por cada tratamiento, localidad y ciclos evaluados, se muestra en la tabla 3-6. Para la localidad de Herveo se detallan los datos de un solo ciclo de producción, debido a que los frutos fueron cosechados dos meses después de haber alcanzado su madurez fisiológica por el productor y esto ocasionó que la generación de nuevos brotes se retrasara, además de que los brotes emitidos fueron vegetativos y no reproductivos.

Tabla 3-6. Lámina y volumen de agua aplicado por árbol en los ciclos evaluados 2014-2015.

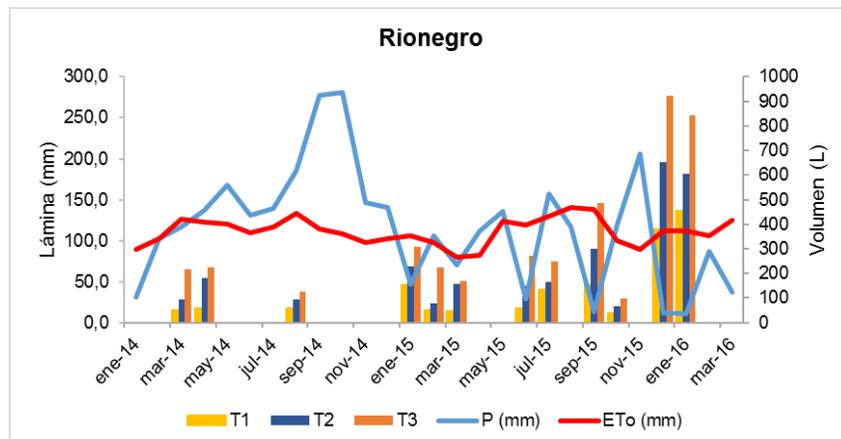
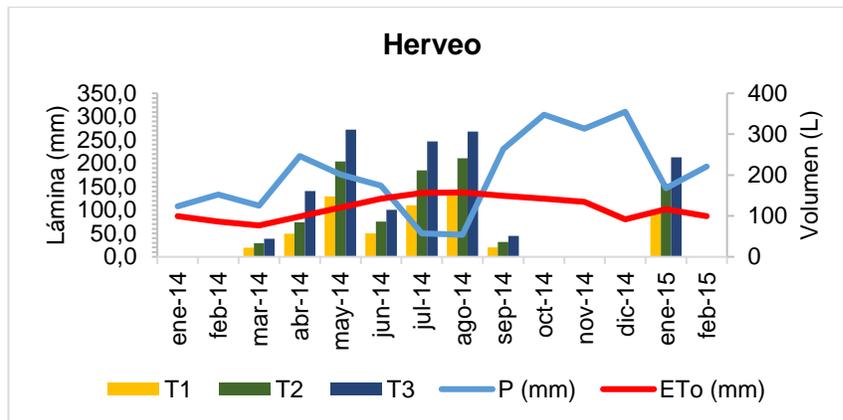
Tratamientos	Ciclo 2014			Ciclo 2015		
	T1 (0,5 ETo)	T2 (0,75 ETo)	T3 (1,0 ETo)	T1 (0,5 ETo)	T2 (0,75 ETo)	T3 (1,0 ETo)
Herveo						
Lámina (mm)	177,4	276,5	378,5			
Volumen (L)	709,6	1106,0	1514,1			
Rionegro						
Lámina (mm)	80,2	154,5	240,8	329,0	543,2	824,1
Volumen (L)	320,7	617,9	963,1	1316,0	2172,9	3296,4
Morales						
Lámina (mm)	180,3	315,1	444,9	250,6	433,6	645,0
Volumen (L)	721,3	1260,3	1779,6	1002,3	1734,5	2580,1

Fuente: (Modificado de Dorado et al., 2017)

Los meses donde se presentó un mayor aporte de riego en el huerto experimental de Herveo fueron de marzo a agosto de 2014, siendo los meses de julio y agosto los de mayor demanda hídrica y en los cuales se presentó un balance hídrico negativo (Figura 3-9). En el municipio de Morales, se evidenció una mayor demanda evaporativa que en las otras dos localidades, en el primer ciclo evaluado, razón por la cual los volúmenes de agua aplicados fueron ligeramente mayores. En julio, agosto y septiembre se aplicó los volúmenes de agua más altos durante el ciclo 2014. Para el segundo ciclo evaluado, en el 2015, se evidenció una disminución en la precipitación y un aumento en la ETo con respecto al análisis multianual, por tanto, aumentó la demanda hídrica atmosférica y el número de eventos de riego, debido principalmente a la alerta de ocurrencia del fenómeno de El Niño, dada por el IDEAM (2015b) en el mes de marzo de 2015 (tabla 3-6). Fue

necesario regar la mayor parte del tiempo con excepción de noviembre; el mes donde se aplicó el volumen más alto fue agosto (figura 3-9).

En Rionegro se observa que el acumulado en precipitación anual en Rionegro es menor al de Herveo y Morales comparando el primer ciclo; sin embargo, el volumen de riego aplicado es menor (tabla 3-6), debido a que la precipitación tuvo una distribución más uniforme. En 2014, solo fue necesario aplicar riego en los meses de marzo, abril y agosto, en 2015 se aplicó riego el mes de enero. Para el segundo ciclo evaluado (2015-2016), Se presentó el mismo fenómeno que en Morales, ocasionando un balance hídrico negativo en algunos meses del año, por tanto, la lámina de riego aumentó considerablemente y se regó durante la mayor parte del año, siendo septiembre el mes más crítico (figura 3-9).



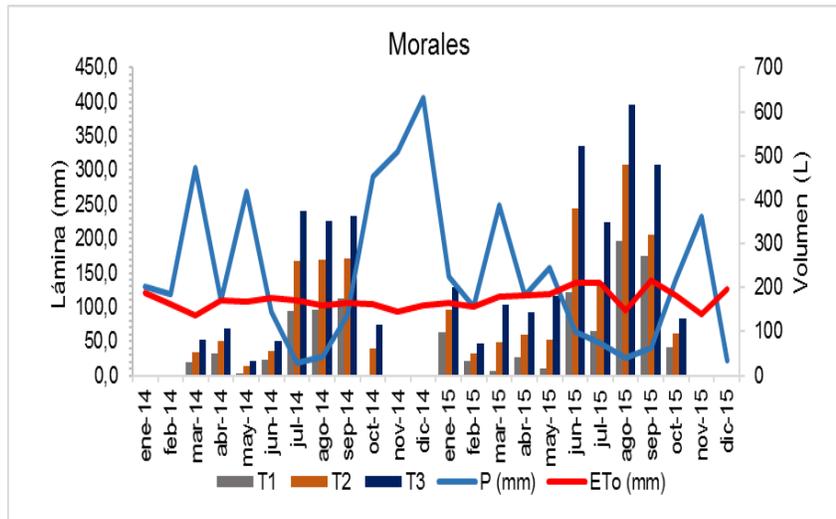


Figura 3-9. Distribución del riego durante los ciclos productivos evaluados en las tres localidades. Fuente: (Modificado de Dorado et al., 2017).

3.2.1 Evaluación rendimiento

Herveo

Para esta localidad se obtuvo diferencias significativas ($P < 0,05$) sobre la variable respuesta rendimiento, indicando que hubo un efecto de los tratamientos sobre el comportamiento de esta. En la tabla 3-7, se muestra el análisis de varianza para esta localidad.

Tabla 3-7. Análisis de varianza para rendimiento (t/ha). Herveo – Tolima

Fuente de Variación	Rendimiento (t/ha)
	Pr >F _c
Trat.	0.0002**
Bloque	0.3488 ns
Bloque x Trat.	0,2856 ns
Promedio	16,2
CV (%)	1,33

*Diferencia estadística significativa ($p < 0,05$), ns: Diferencia estadística no significativa ($p > 0,05$), CV: Coeficiente de variación. Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los resultados obtenidos el mejor tratamiento fue el T2 (0,75ETo) que presentó diferencias significativas respecto a los demás tratamientos evaluados, con un rendimiento promedio de 19,11 t/ha, seguido por el T3 (1,0ETo) con una diferencia de casi 3 t/ha. El valor más bajo se obtuvo con el T4, tratamiento testigo (Tabla 3-8). Estos valores presentados, son superiores a los reportados en el huerto antes de iniciar el ensayo (7,5 t/ha) y a lo reportado por Agronet (2014) que, para la región del Tolima en el 2014, se tuvo un rendimiento promedio de 8,2 t/ha. Esta información indica la importancia de la aplicación de agua, especialmente en los meses del año donde la demanda hídrica del cultivo es mayor (junio-agosto).

Tabla 3-8. Efecto de diferentes regímenes de manejo del agua de riego en el rendimiento (t/ha) del cultivo de aguacate Hass. Herveo - Tolima

Tratamientos	Descripción	Rendimiento (t/ha)
T1	0,5ETo	16,95 c
T2	0,75ETo	19,11 a
T3	1,0ETo	17,85 b
T4	Testigo	13,32 d

¹Números con misma letra no difieren estadísticamente. Fuente: Elaboración propia

Rionegro

En esta localidad el rendimiento tuvo una respuesta significativa a la aplicación de los tratamientos de riego, presentando diferencias estadísticas entre las láminas evaluadas ($p < 0,05$). En la tabla 3-9 se presenta el análisis de varianza realizado a los resultados obtenidos en el huerto experimental de Rionegro en dos ciclos de producción.

Tabla 3-9. Análisis de varianza para rendimiento (t/ha). Rionegro-Antioquia

Fuente de Variación	Rendimiento Ciclo 1 (t/ha)	Rendimiento Ciclo 2 (t/ha)
	Pr >F _c	Pr >F _c
Trat	0,0353*	0,0081**
Bloque	0,1355 ns	0,8469 ns
Bloque x Trat	0,488 ns	0,5719 ns
Promedio	23,9	11,4
CV (%)	35,5	26

*Diferencia estadística significativa ($p < 0,05$), ns: Diferencia estadística no significativas ($p > 0,05$), CV: Coeficiente de variación. Fuente: Elaboración propia

El tratamiento T2 obtuvo los valores más altos de rendimiento, en los dos ciclos productivos evaluados, presentando diferencias significativas respecto a los demás tratamientos (Tabla 3-10). Para el ciclo uno el rendimiento promedio para T2 fue de 28,1 t/ha, superior a lo registrado como línea base del huerto al iniciar el ensayo (12,8 t/ha) y con diferencias significativas respecto al T1. Aunque en el ciclo dos el rendimiento disminuyó en todos los tratamientos, debido quizás a la alternancia productiva que se da en cultivos como el aguacate, donde al presentarse un ciclo productivo con alta floración o demora en el tiempo de cosecha, al ciclo siguiente los árboles presentan menor floración o incluso no producen (Lovatt, 2010), de igual forma el T2 con un rendimiento medio de 15,1 t/ha presentó diferencias estadísticas significativas con T1 y T4, además se mantuvo por encima del promedio reportado para el huerto y el promedio departamental, que para el 2014 fue de 9,9 t/ha (Agronet, 2014), Los valores más bajos se obtuvieron con el T1 los dos ciclos de producción evaluados, con promedios de 16 t/ha (ciclo 1) y 8,4 t/ha (ciclo 2).

En general para el ciclo 1 (2014-2015) y el ciclo 2 (2015-2016) el tratamiento T2 tuvo un efecto significativo en la producción de aguacate con un promedio entre los dos ciclos de 21,47 t/ha, seguido por el testigo con un rendimiento medio entre los dos ciclos de 20,33 t/ha, los cuales no difieren estadísticamente, mientras que T1 y T3 mostraron los promedios más bajos y además presentaron diferencias estadísticamente significativas con T2 (Figura 3-10)

Tabla 3-10. Efecto de diferentes regímenes de manejo del agua de riego en el rendimiento (t/ha) del cultivo de aguacate Hass. Rionegro-Antioquia

Tratamientos	Descripción	Rendimiento Ciclo 1 (t/ha)	Rendimiento Ciclo 2 (t/ha)
T1	0,5ETo	16,0 b	8,4 c
T2	0,75ETo	28,1 a	15,1 a
T3	1,0ETo	20,3 ab	12,6 ab
T4	Testigo	26,8 a	9,7 bc

¹Números con misma letra no difieren estadísticamente. Fuente: Elaboración propia

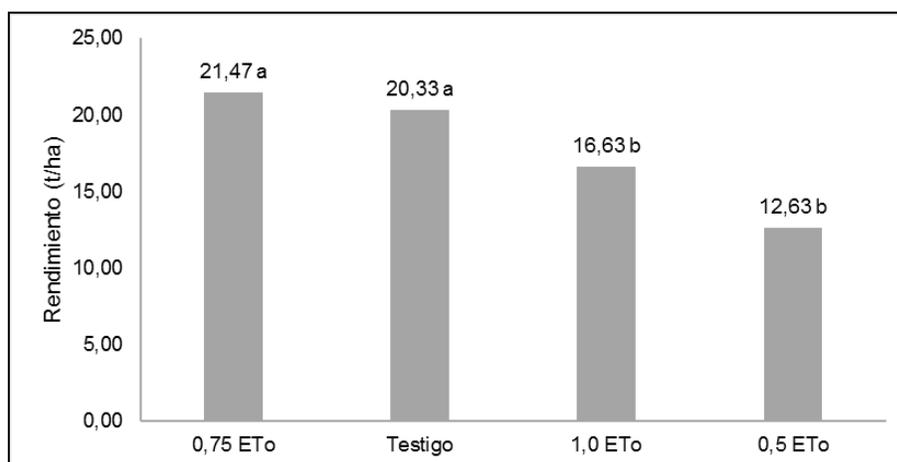


Figura 3-10. Rendimiento promedio entre los ciclos evaluados 2014-2015. Rionegro-Antioquia. Fuente: Elaboración propia

Morales

Para esta localidad hubo efecto de los tratamientos de riego sobre el rendimiento para el primer ciclo presentando diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$). En el ciclo dos hubo un efecto de bloque y un efecto combinado de tratamiento y bloque, que no afectó significativamente los promedios de rendimientos en el segundo ciclo de evaluación. En la tabla 3-11 se observa el análisis de varianza realizado para el municipio de Morales.

Tabla 3-11. Análisis de varianza para rendimiento (t/ha). Morales-Cauca

Fuente de Variación	Rendimiento Ciclo 1 (t/ha)	Rendimiento Ciclo 2 (t/ha)
	Pr >F _c	Pr >F _c
Trat.	0,0002**	0,06873 ns
Bloque	0,7320 ns	0,0464*
Bloque x Trat	0,0195**	0,0005**
Promedio	4,02	7,5
CV (%)	2,86	13,47

*Diferencia estadística significativa ($p < 0,05$), ns: Diferencia estadística no significativas ($p > 0,05$), CV: Coeficiente de variación. Fuente: Elaboración propia

En el ciclo uno (2014-2015) se presentó una caída de la floración principal debido a vientos por encima de 6 m/s considerador como fuertes (figura 3-11) que afectaron esta zona durante ese período, 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), quién 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. Por esta razón los valores de rendimiento fueron bajos, sin embargo, con T2 se obtuvo un rendimiento promedio de 7,8 t/ha, superior al reportado como línea base inicial a la instalación del experimento y lo registrado para el departamento del Cauca de 6,6 t/ha (Agronet, 2014), presentando diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) con los demás tratamientos. El valor más bajo se obtuvo con T1 con un rendimiento de 1,32 t/ha (tabla 3-12).

En el ciclo dos los rendimientos para todos los tratamientos fueron superiores al ciclo anterior, siendo T3 el que mostró un valor mayor (22,3 t/ha), dado principalmente a que este ciclo las precipitaciones fueron considerablemente mas bajas y durante el inicio del ciclo (febrero a junio) hubo amenaza de ocurrencia de fenómeno de El Niño (IDEAM, 2015) y esta situación pudo incrementar la demanda hídrica del cultivo. T2 presentó un rendimiento promedio de 21,6 t/ha (Tabla 3-12), sin presentar diferencias estadísticas significativas ($p > 0,05$) entre tratamientos. En general entre ciclos el tratamiento con mejor respuesta al rendimiento fue T2 con un valor promedio de 14,7 t/ha, seguido por T3 con un valor de 14,02 t/ha, lo cuales no presentan diferencias entre sí. Los tratamientos T1 y T4 obtuvieron el promedio de 10,76 t/ha y 10,26 t/ha entre los dos ciclos evaluados, que además difieren estadísticamente de los tratamientos T2 y T3 ($p < 0,05$). En la figura 3-12, se puede observar los promedios generales de rendimiento entre los ciclos 2014-2015 y 2015-2016.

Tabla 3-12. Efecto de diferentes regímenes de manejo del agua de riego en el rendimiento (t/ha) del cultivo de aguacate Hass. Morales-Cauca

Tratamientos	Descripción	Rendimiento Ciclo 1 (t/ha)	Rendimiento Ciclo 2 (t/ha)
T1	0,5ETo	1,32 d	20,2 a
T2	0,75ETo	7,8 a	21,6 a
T3	1,0ETo	5,74 b	22,3 a
T4	Testigo	2,91 c	17,6 a

¹Números con misma letra no difieren estadísticamente. Fuente: Elaboración propia

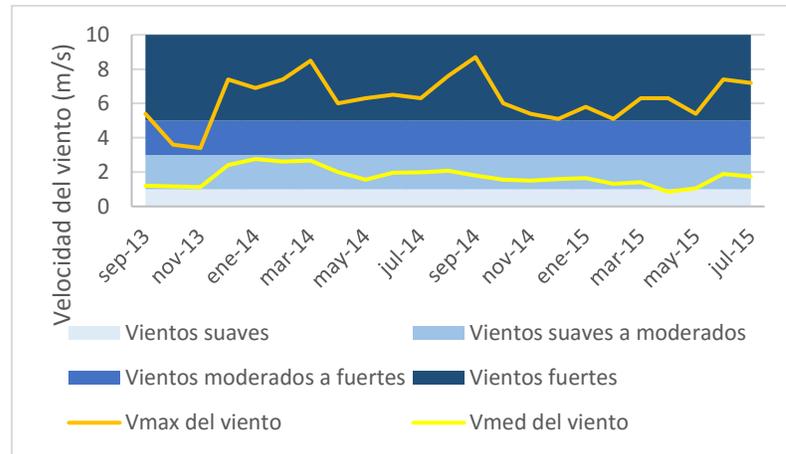


Figura 3-11. Comportamiento de la velocidad del viento en el municipio de Morales (Cauca). Fuente Dorado et al., 2017

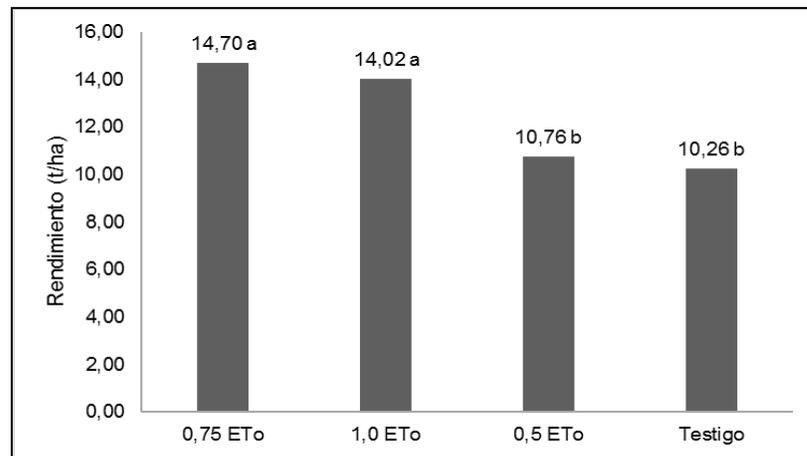


Figura 3-12. Rendimiento promedio entre los ciclos evaluados 2014-2015. Morales-Cauca. Fuente: Elaboración propia

La comparación entre localidades arrojó que existen diferencias significativas entre ellas ($p < 0,05$) y aunque por tratamientos el análisis de varianza no logró detectar diferencias, la diferencia entre tratamientos es notoria (tabla 3-13). El tratamiento de riego T2 presentó el mejor promedio en rendimiento con un valor de 19,2 t/ha, seguido por T3 (17,6 t/ha) difiriendo estadísticamente de los tratamientos T1 y T4, tal y como se muestra en la figura 3-13. Cabe anotar que para todas las localidades con T2 mantuvo los promedios de rendimiento por encima de los promedios regionales en cada departamento y lo obtenido por los productores en ciclos anteriores. Salazar-García (2002) reporta para aguacate Hass

un potencial de producción de 32,5 t/ha bajo condiciones subtropicales, sin embargo, para las condiciones tropicales, andinas, donde se desarrolló el experimento este rendimiento podría alcanzarse.

Tabla 3-13. Análisis de varianza para rendimiento (t/ha) entre localidades

Fuente de Variación	Rendimiento (t/ha)
	Pr >F _c
Loc	0,0001 **
Trat	0,0638 ns
Loc*Trat	0,0195**
Promedio	16,2
CV(%)	41,2

*Diferencia estadística significativa ($p < 0.05$), ns: Diferencia estadística no significativas ($p > 0.05$), CV: Coeficiente de variación. Fuente: Elaboración propia

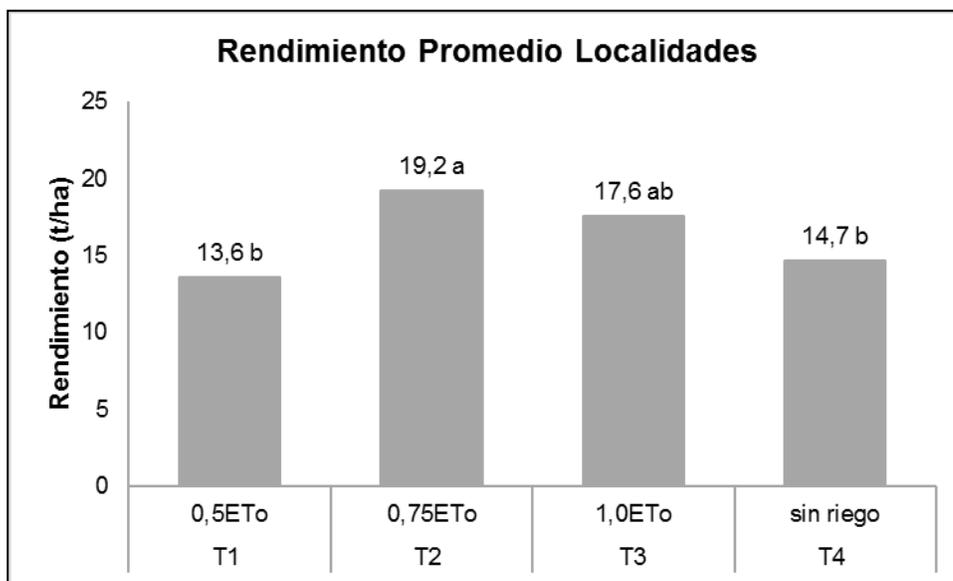


Figura 3-13. Rendimiento promedio entre localidades y ciclos evaluados. Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los resultados obtenidos, el tratamiento T2 equivalente a la aplicación una lámina de riego del 0,75ETo, presentó el mejor comportamiento en cuanto a producción se refiere, manteniendo valores de rendimiento superiores al valor promedio reportado en Agronet (2014) para el cultivo de aguacate en huertos tecnificados de 17 t/ha. Ferreyra y Selles (2007, Capítulo de libro, Estudio FAO: Riego y Drenaje 66) mencionan que a nivel mundial el rendimiento del cultivar Hass está alrededor de 12 t/ha y en años de “buena”

producción puede alcanzar 25 t/ha, valores que fueron superados en el experimento por los árboles sometidos a T2 y T3 en Rionegro y Morales, en los ciclos 1 y ciclo 2 respectivamente.

En este sentido los requerimientos hídricos para el cultivo de aguacate Hass bajo condiciones de andinas puede estimarse en un coeficiente del cultivo (K_c) igual a 0,75, similar a lo reportado por Ferreyra et al. (2007), que, para condiciones del Valle del Aconcagua, Chile, reportan un K_c de 0,72; al igual que Gardiazabal *et al.* (2003) quienes también reportan para la zona de Chillota, Chile, un K_c de 0,72 durante todo el ciclo productivo. En California se ha reportado un K_c de 0,7 para árboles maduros, durante su ciclo productivo (Faber, 2006). Chuchon-Prado (2015) para condiciones de la región de Tambillo, Perú, establece para aguacate Hass un K_c de 0,75, similar a lo recomendado por Allen *et al.* (2006) quienes recomiendan para el cálculo de los requerimientos hídricos del cultivo un K_c de 0,75, bajo condiciones subtropicales.

Aunque para condiciones edafoclimáticas tropicales como las de Colombia, no existe una recomendación de K_c , el resultado de esta investigación puede ser la línea base para continuar con la investigación en cuanto a manejo hídrico en el cultivo, puesto que el sistema productivo del aguacate Hass en las diferentes zonas productoras del país no poseen un sistema de riego, los agricultores pueden implementar este desarrollo tecnológico con el que pueden hacer su cultivo más eficientes y resilientes al cambio climático.

3.2.2 Análisis económico

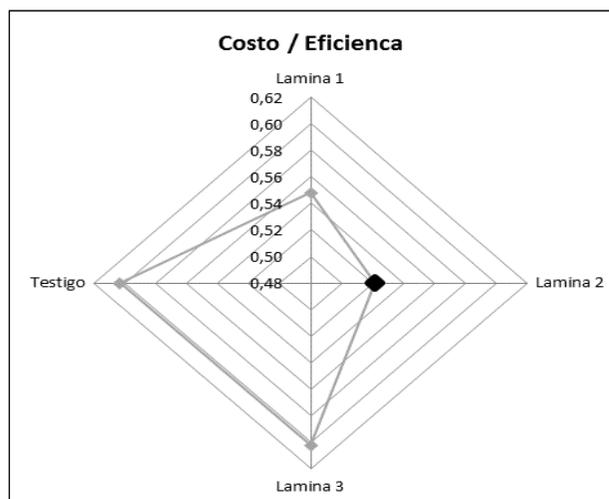
Para el siguiente análisis se muestra el cálculo del VPN o VAN por sus siglas en inglés, calculado para un periodo de 5 años, dada la vida útil del sistema de riego. Proyectando el incremento en los ingresos monetario y costos monetarios con una tasa promedio de inflación calculada para un periodo de 2011 – 2015.

Herveo**Tabla 3-14.** Valor presente neto y relación costo-eficiencia (C/E). 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: Dorado et al., 2017

Calculado con una producción constante durante el periodo, se tiene la maximización de los ingresos por cada tratamiento de riego aplicado dado el VPN, donde 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 (C/E) se tiene que todas las láminas usadas presentan valores menores a 1, lo que indica que siempre los Ingresos Netos fueron mayores a la inversión realizada. Sin embargo, los resultados obtenidos muestran que para la localidad de Herveo, T2 presenta una mayor eficiencia con un mínimo de costos monetarios, como lo indica la figura 3-14 donde el punto más cercano a cero (0), indica una mayor eficiencia respecto a un mínimo de costos.

**Figura 3-14.** Relación costo-eficiencia (C/E) de aplicación de los tratamientos de riego. Herveo. Fuente: Dorado et al., 2017

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 Kc=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 3-15 se observa que para el tratamiento T2, se tiene un decremento en los ingresos dado que el VPN es negativo, aunque si bien los demás valores calculados son positivos no explica la factibilidad total la aplicación de cada lamina, por lo tanto analizando el comparativo (C/E) se observó que todos los valores calculados son mayores a uno (>1), por lo tanto 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 3-15 muestra por tratamiento los puntos (C/E) donde el más cercano a cero indica una mayor eficiencia respecto a un mínimo de costos.

Tabla 3-15. Valor presente neto y relación costo-eficiencia (C/E). 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: Dorado et al., 2017

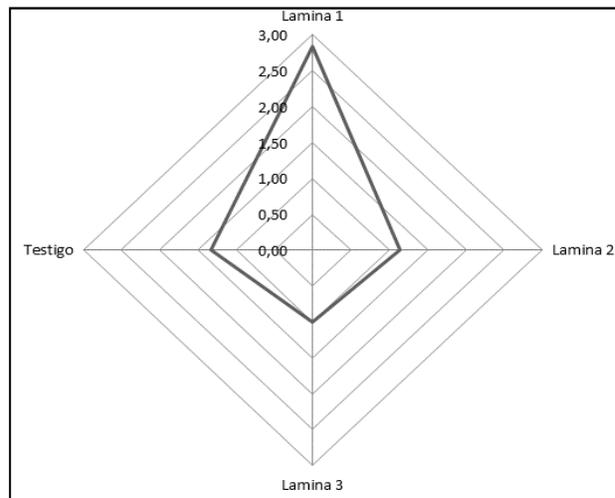


Figura 3-15. Relación costo-eficiencia de aplicación de los tratamientos de riego. Morales. Fuente: Dorado et al., 2017

La diferencia radica en la producción del ciclo 1. En este ciclo los ingresos netos fueron negativos, y aunque en el ciclo 2 los ingresos aumentaron 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 tanto, 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 (C/E) se tiene que todos los tratamientos evaluados presentan valores menores a 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 3-16, 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 haya 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 3-16. Valor presente neto y relación costo-eficiencia (C/E). 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: Dorado et al., 2017

En la figura 3-16 se resume el comportamiento de los tratamientos en cuanto a la relación C/E, siendo el punto más cercano a cero (0) el que indica una mayor eficiencia respecto a un mínimo de costos.

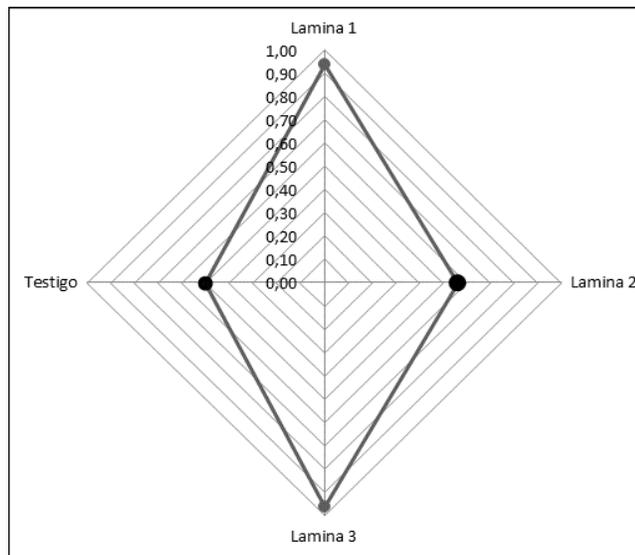


Figura 3-16. Relación costo-eficiencia de aplicación de los tratamientos de riego. Rionegro

3.3 Indicadores de sostenibilidad ambiental

3.3.1 Eficiencia en el uso del agua (EUA)

Herveo

El tratamiento T1 obtuvo la mejor eficiencia en el uso del agua de riego (EUA) con un valor de 9,55 kg/m³, seguido por T2 (0,75ET₀) con un valor de EUA igual a 6,91 kg/m³ (tabla 3-17). 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 eficiencia en el uso del agua 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.

Tabla 3-17. Uso eficiente del agua en Herveo, Tolima

Tratamientos	Ciclo I			
	T1	T2	T3	T4
Herveo				
Producción (kg/ha)	16947,5	19106,8	17852,0	13360,9
Lámina (mm)	177,4	276,5	378,5	2210,9
EUA (kg.mm ⁻¹ .ha ⁻¹)	95,5	69,1	47,2	6,0
EUA (kg/m ³)	9,55	6,91	4,72	0,60

Fuente: Elaboración propia

Morales

Para esta localidad el indicador EUA fue mayor con T2 en comparación a los otros tratamientos obteniendo un valor para el indicador de 2,48 kg/m³ en el ciclo I, para el ciclo II el valor más alto se obtuvo con T1 presentado un valor de 8,06 kg/m³ seguido por T2. Con T4 se obtuvo los valores más bajos de EUA para los dos ciclos de producción (Tabla 3-18), asociado a la baja producción reportada para el testigo. Estos resultados permiten determinar la necesidad de riego en los cultivos de aguacate, debido a que con el aporte de agua de las precipitaciones no se cubre totalmente las necesidades hídricas del cultivo durante todo el ciclo productivo.

Tabla 3-18. Uso eficiente del agua en Morales, Cauca

Tratamientos	Ciclo I				Ciclo II			
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
Morales								
Producción (kg/ha)	1328,1	7804,4	5741,3	4061,3	20188,0	21546,0	22341,0	17635,0
Lámina (mm)	80,2	154,5	240,8	2431,2	329,0	543,2	824,1	1076,4
EUA (kg.mm ⁻¹ .ha ⁻¹)	7,4	24,8	12,9	1,7	80,6	49,7	34,6	16,4
EUA (kg/m ³)	0,74	2,48	1,29	0,17	8,06	4,97	3,46	1,64

Fuente: Elaboración propia

Rionegro

En esta localidad y al igual que en Morales para el ciclo I, T1 tuvo el valor más alto del indicador EUA, seguido estrechamente por T2 con valores de 19,96 kg/m³ y 18,18 kg/m³ respectivamente. En el ciclo II, la relación se mantuvo igual solo que el mayor valor se obtuvo con T2 (2,77 kg/m³), significativamente menor a lo obtenido en el ciclo I, explicado por la alternancia productiva, fenómeno fisiológico propio de plantas como el aguacate (Lovatt, 2010). Los tratamientos T3 y T4 presentaron los valores más bajos en los dos ciclos de producción evaluados (tabla 3-19).

Tabla 3-19. Uso eficiente del agua en Rionegro, Antioquia

Tratamientos	Ciclo I				Ciclo II			
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
Rionegro								
Producción (kg/ha)	16004,0	28076,0	20330,0	26762,0	8443,4	15027,4	12603,0	9675,0
Lámina (mm)	180,3	315,1	444,9	1771,0	250,6	433,6	645,0	1176,3
EUA (kg.mm ⁻¹ .ha ⁻¹)	199,6	181,8	84,4	15,1	25,7	27,7	15,3	8,2
EUA (kg/m ³)	19,96	18,18	8,44	1,51	2,57	2,77	1,53	0,82

Fuente: Elaboración propia

El tratamiento T1 mostró valores más altos en promedio para las tres localidades del indicador EUA (8,18 kg/m³). El tratamiento T2 presentó un valor promedio para los tres huertos experimentales de 7,06 kg/m³, mientras que con T4 se obtuvo valores por debajo de 1 kg/m³ (figura 3-17).

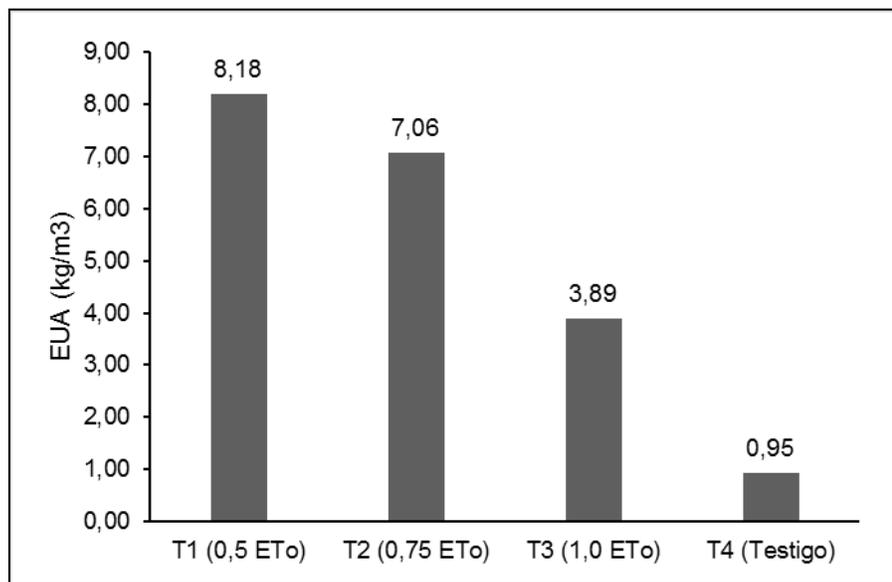


Figura 3-17. Eficiencia en el uso del agua promedio para las tres localidades. Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los resultados obtenidos para el indicador EUA, con la aplicación de los tres tratamientos de riego se obtuvo valores superiores a los reportados en la literatura. Lahav et al. (1992; Citado por Carr, 2012) mencionan que para el cv Hass, bajo condiciones de Israel, obtuvieron un EUA de $2,2 \text{ kg/m}^3$ con un aporte adicional de agua entre 283 a 572 mm, mientras que en los huertos experimentales de Rionegro y Herveo, con una lámina aplicada en el primer ciclo de 180 mm, se obtuvo un EUA de $19,96 \text{ kg/m}^3$ y $9,55 \text{ kg/m}^3$ respectivamente. En un ensayo realizado también en Israel, se obtuvo, para una aplicación de una lámina acumulada entre los 300 a 600 mm un EUA de $1,57 \text{ kg/m}^3$ (Steinhardt, 1991; citado por Carr, 2012), superior a calculado para el huerto experimental de Morales que con lámina entre 154 y 329 mm (T2-Ciclo I; T1-Ciclo 2) presentó valores de $2,48 \text{ kg/m}^3$ y $8,06 \text{ kg/m}^3$ respectivamente.

En este sentido es posible establecer la importancia de implementar un manejo de riego en los huertos de aguacate en las zonas productoras evaluadas, debido a que la aplicación oportuna de riego puede aumentar la producción de fruta fresca.

Si bien al aplicar una lámina de riego correspondiente a un $K_c=0,5$ (T1) el EUA tuvo el mejor comportamiento, la lámina de $K_c=0,75$ obtuvo un mayor rendimiento promedio para dos ciclos de producción en los tres huertos experimentales y una mejor relación

beneficio/costo, comparada con los demás tratamientos aplicados y llevando este indicador a términos económicos, con una lámina del 0,75ETo se puede tener 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.

3.3.2 Indicadores de gestión del agua de riego

Los indicadores de gestión del riego evaluados fueron suministro relativo de agua (RWS por sus siglas en inglés), suministro relativo de riego (RIS por sus siglas en inglés) y suministro relativo de agua por precipitaciones (RRS por sus siglas en inglés). La estimación de estos indicadores permitió establecer la relación entre los requerimientos hídricos del cultivo de aguacate Hass y la oferta de agua para suplir esa demanda. En promedio se obtuvo para las tres localidades valores de 2,44, 1,48, 2,05 para RWS, RIS y RRS respectivamente (Tabla 3-20). En cuanto a la diferenciación por tratamientos de riego los valores obtenidos fueron de 2,3, 1,6 y 1,9 de RWS, RIS y RRS respectivamente (Tabla 3-21)

Levine (1982) señala como umbral mínimo del indicador RWS de 1,5, valores inferiores a éste indican una disponibilidad limitada de agua lo que implica un manejo eficiente del riego para suplir las necesidades del cultivo, sin embargo, Molden et al. (1998) mencionan que valores por encima de 2 muestran una adecuada disponibilidad de agua para suplir los requerimientos. En las tablas 3-20 y 3-21, se observa que tanto para los promedios por localidad y tratamientos este indicador es superior a 1,5, sugiriendo que la disponibilidad de agua para suplir los requerimientos hídricos del cultivo de aguacate Hass en las tres localidades es adecuada y que no existe una sobre explotación del recurso, lo que permite inferir que la aplicación de riego se hizo de manera eficiente incluso para el tratamiento con mayor demanda hídrica (T3)

En el caso del indicador RIS, que determina si satisfacen las necesidades hídricas del cultivo no cubiertas por las precipitaciones, entre localidades, Herveo y Rionegro presentaron valores cercanos a la unidad, 1,05 y 0,91, lo que significa, de acuerdo con Roldan *et al.* (2010) que los requerimientos hídricos del cultivo fueron cubiertos por el riego

aplicado. En Morales en promedio el RIS fue de 2,49, indicando que el agua aplicada excede, en cierta medida la demanda evaporativa del cultivo (Tabla 3-20). Al comparar RIS con los tratamientos de riego aplicados, se observó que T2 y T1 presentaron los valores cercanos a uno, aunque autores como Roldán *et al.* (2010) y Pérez *et al.* (2009) consideran que valores de RIS por debajo de uno, como el arrojado por T2 (0,8) indican un déficit hídrico, también mencionan que cuando RWS supera la unidad significa que la demanda evaporativa del cultivo es suplida.

Tabla 3-20. Valores promedio para las tres localidades de RWS, RIS y RRS

Localidad	RWS	RIS	RRS
Herveo	3,05	1,05	2,70
Morales	2,29	2,49	1,84
Rionegro	1,97	0,91	1,62
Promedio	2,44	1,48	2,05

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-21. Valores promedio para tratamientos de riego de RWS, RIS y RRS

Tratamiento	RWS	RIS	RRS
T1 (0,5ETo)	3,0	1,3	2,7
T2 (0,75ETo)	2,2	0,8	1,8
T3 (1,0ETo)	1,8	2,6	1,3
Promedio	2,3	1,6	1,9

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3-18, se observa como para Morales, aunque el promedio general mostró un indicador de gestión del riego RIS superior a 1, para el tratamiento T2 (0,75ETo) este mismo indicador se mantuvo dentro de los valores adecuados (Ciclo I: 1,06; Ciclo II: 0,98) lo que significa que el manejo del riego bajo este tratamiento se hace de manera eficiente y el agua aplicada suple correctamente los requerimientos del cultivo. A su vez esto coincide con los resultados obtenidos de rendimiento, en los cuales T2 presentó los resultados más destacados para esta localidad.

Del mismo modo en Rionegro en el ciclo I, el tratamiento T3 (1,0 ETo) presentó un valor de RIS de 1,12 y para el ciclo II los tres tratamientos obtuvieron valores cercanos a la unidad (figura 3-18), debido a que para el segundo ciclo evaluado las lluvias disminuyeron, permitió evidenciar un manejo eficiente del riego, sin embargo y al igual que en Morales, T2 arrojó los resultados más destacados en cuanto a producción. Para Herveo los tratamientos T2 y T3 presentaron un RIS de 0,56, indicando, en teoría, un déficit hídrico, sin embargo, la producción no se vio afectada, por lo contrario, con T2, se obtuvo el mayor rendimiento para esta zona, esto permite inferir que las lluvias presentadas durante el período de evaluación en el huerto experimental de Herveo, suplieron en un 40% la demanda hídrica de la plantación.

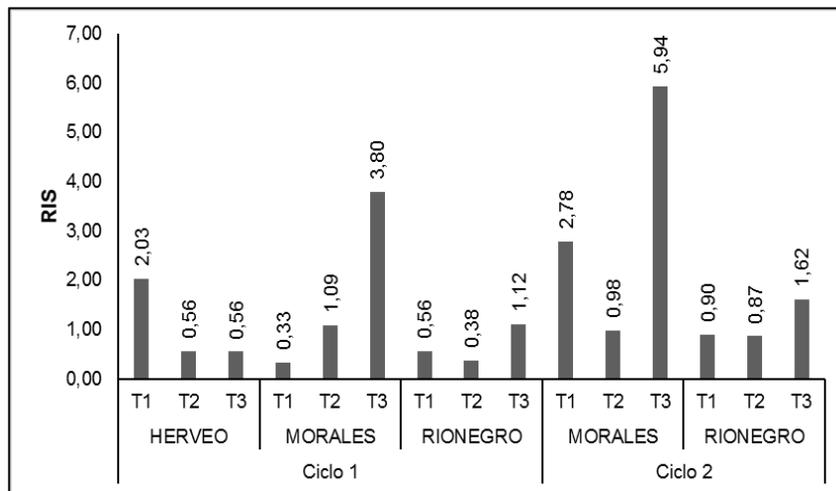


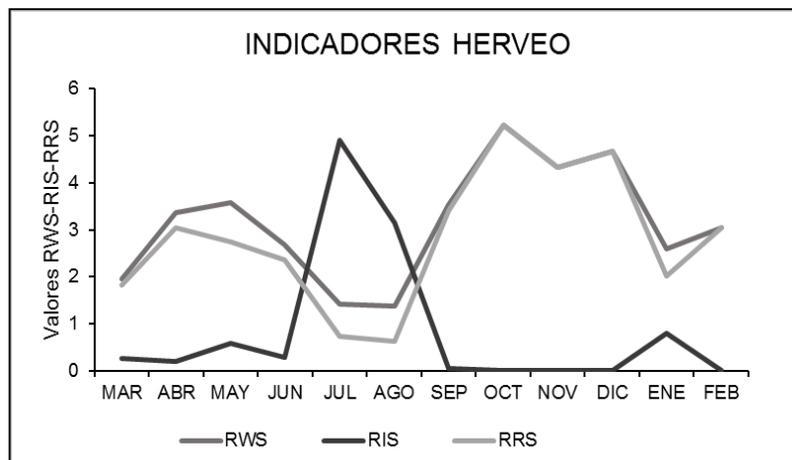
Figura 3-18. Valores de indicador RIS para las zonas de estudio y tratamientos de riego evaluados.

El indicador disponibilidad relativa de agua por precipitaciones (RRS), permite establecer si la cantidad de agua aportada por las lluvias suple las necesidades hídricas del cultivo. RRS y RWS tienen una estrecha relación debido a que se puede establecer a partir de la diferencia entre ambos indicadores en que cuantía, las lluvias suplen la demanda hídrica y cuanto es necesario aportar por riego. Cuando RRS es igual a RWS indica que no se requiere riego (Rodríguez *et al.*, 2005, citado por Roldán *et al.*, 2010). En la figura 3-19, se graficó el comportamiento de estos indicadores durante los períodos de evaluación, por ciclo productivo y localidad, encontrando durante el primer ciclo de evaluación para Herveo fue necesario la aplicación de riego, especialmente en los meses de julio y agosto donde el déficit hídrico fue más marcado, entre los meses de septiembre, octubre y noviembre las

altas precipitaciones en las tres zonas de estudio satisficieron los requerimientos hídricos del cultivo de aguacate, siendo RWS igual a RRS.

Para Morales, en el ciclo 1 las altas precipitaciones en el primer semestre fueron suficientes para suplir los requerimientos del cultivo, sin embargo, en el mes de abril de 2014, se presentó un leve déficit, durante el cual se aplicó riego. Al igual que en Herveo, en Morales entre los meses de julio y agosto las lluvias disminuyeron por lo cual el riego se hizo más constante. Para el ciclo 2 el período de déficit hídrico se extendió iniciando en el mes de marzo hasta octubre de 2015 donde las lluvias aumentaron y los requerimientos hídricos fueron suplidos por éstas (Figura 3-19).

En Rionegro, el período de déficit se da en los meses de diciembre, enero y febrero, por tal razón al inicio del ciclo 1 se aplicó riego en el mes de marzo, por la disminución de las precipitaciones, entre los meses de julio y agosto, al igual que en las demás localidades se marcó un déficit, sin embargo, para esta zona fue moderado. Se observó que al finalizar el ciclo 1 e inicio del ciclo 2 el riego se hizo necesario debido a la disminución de las lluvias, dada históricamente, durante los meses de diciembre, enero y febrero. Asimismo, durante el período comprendido entre mayo y octubre de 2015, debido a las condiciones climáticas la aplicación de las láminas de riego fue mas constante (Figura 3-19). Durante los periodos de lluvia, éstas suplieron las necesidades hídricas del cultivo (RWS igual a RRS)



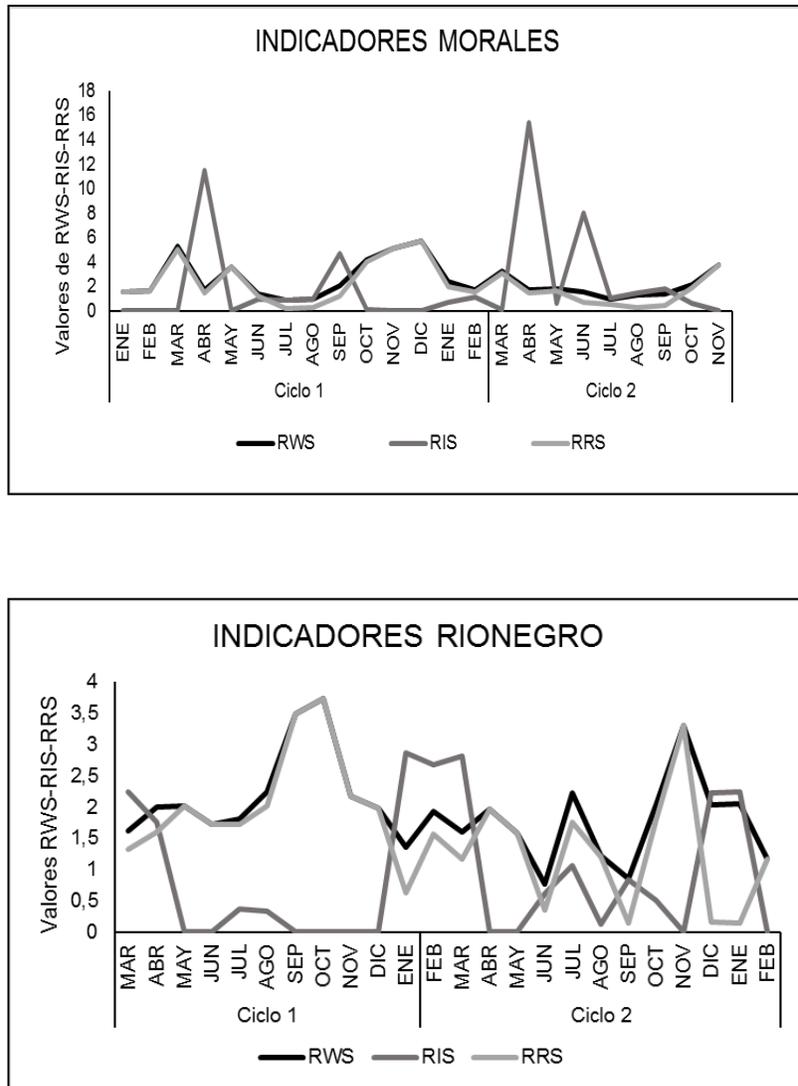


Figura 3-19. Comportamiento de los indicadores RWS y RRS en las zonas de estudio por tratamientos de riego.

Con el uso de los indicadores de gestión sostenible del riego en sistemas productivos como el aguacate Hass en Colombia, donde no se aplica riego, permiten cuantificar, dependiendo del régimen hídrico de cada zona, si el aporte de agua de las lluvias es suficiente para suplir la demanda hídrica del cultivo. Los resultados obtenidos mostraron que el agua de las precipitaciones no satisface las necesidades de agua de los huertos, evidenciando la importancia de contar con un sistema de riego eficiente que permita suplir el agua requerida por las plantas para no afectar su comportamiento productivo

rendimiento, más teniendo en cuenta que existen períodos durante el ciclo en los cuales hay un déficit hídrico que generalmente coincide con etapas fenológicas importantes como floración y cuajado de fruto, tal como se evidenció. En este sentido el empleo de indicadores de sostenibilidad ambiental juega un papel vital, ya que se convierten en herramientas para medir la eficiencia del uso del recurso hídrico relacionado con la producción de fruta fresca.

4. CONCLUSIONES

Tecnificar el cultivo de aguacate Hass con un sistema de riego por goteo, incrementa la producción en al menos un 23%, aplicando la lámina adecuada, lo que permitiría en al menos dos ciclos de producción recuperar la inversión, mejorar las ganancias y calidad de vida del productor, más aún teniendo en cuenta la apuesta exportadora que tiene este producto.

La lámina de riego correspondiente al 0,75ET_o (T2) permite sugerir el valor de 0,75 como K_c conveniente para la estimación de la evapotranspiración del aguacate Hass en su etapa productiva. Este valor permite ahorrar el 25% de agua en comparación al tratamiento de riego T3 (1,0ET_o). También es importante resaltar que el riego en el sistema productivo de aguacate Hass, es fundamental para garantizar el éxito de la producción de un ciclo a otro.

El tratamiento T1 (0,5ET_o) presentó un EUA superior a los demás tratamientos evaluados, en promedio, para las tres localidades, sin embargo, al observar el comportamiento entre ciclos, el EUA para T2 fue más constante e incluso mayor en el ciclo 1 para Morales y ciclo 2 para Rionegro.

Los indicadores RWS, RIS y RRS permitieron establecer que la mejor alternativa de manejo del riego para el cultivo de aguacate Hass en las zonas de estudio, es aplicar una lámina de agua equivalente al 0,75ET_o, ya que bajo este tratamiento se obtuvo la mejor eficiencia en cuanto a manejo racional del agua comparando la oferta hídrica con las demandas de agua del cultivo y el efecto sobre la producción.

5. BIBLIOGRAFÍA

Abtew, W., and J. Obeysekera. 1995. Lysimeter study of evapotranspiration of Cattails and comparison of three estimation methods. Transactions of the ASAE, 38 (1): 121-129.

Agronet. 2014. Evaluaciones agropecuarias municipales (EVA). [consultado [2016 ago 18]. <http://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/default.aspx>.

Alegre, H., Hirnir, W., Melo, J., Parena, R. 2000. *Performance indicators for water supply services*. IWA Publishing

Allen, R.G., Pereira, L.S., 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, C.J., Alcántar, J.J., Toledo, B.R., Tapia, L. M. y Vidales-Fernández J. A. 2007. Caracterización edafoclimática del área productora de aguacate de Michoacán, México. Proceedings VI World Avocado Congress (Actas VI Congreso Mundial del Aguacate). Viña Del Mar, Chile. 12 – 16 Nov.

Arnalds O, Stahr K. 2004. Volcanic soil resources: occurrence, development, and properties. Catena. 56(1-3):1-2.

Bartoli JA. 2008. Manual técnico del cultivo del aguacate Hass (*Persea americana* L.). La Lima, Honduras: Fundación Hondureña de Investigación.

Barrientos, A. F. y López-López, L. 1999. Historia y Genética Del Aguacate. En: Avocado source www.avocadosource.com. Coatepec Harinas, México: Memoria Fundación Salvador Sánchez Colín CICTAMEX S.C. 1998-2001.

Bernal, J. A. y Díaz, C. A. (2005) Manual técnico No. 5: Tecnología para el cultivo del Aguacate. Colombia: Ed. Produmedios. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria CORPOICA, Centro de Investigación La Selva, Río Negro, Antioquia. (P. 241).

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 cv. Hass para la zona de Quillota. Taller de Licenciatura. Ing. Agr. Quillota, Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de Agronomía. 80p

Camero J. F. 2009. Aguacate hass en Colombia, El reto de sembrar un producto de exportación, o consolidar primero un mercado doméstico con grandes posibilidades. Corporación Colombia Internacional. Disponible en: www.avocadosource.com/international/colombia_papers/CameroJose2009.pdf.

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 Hortic. 1(2):246-257.

Cardemil, G. 1999. Aproximación a los requerimientos hídricos del palto (*Persea americana* Mill) cv. Hass para la provincia de Quillota. Taller de Licenciatura. Ing. Agr. Quillota, Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de Agronomía. 154p.

Carr, M.K.V. 2013. The water relations and irrigation requirements of avocado (*Persea Americana* Mill.): A review. Expl Agric. Cambridge University Press, volume 49 (2), pp. 256-278.

Chuchon-Prado, E. 2015. Calculo de demanda de agua y necesidad de riego para cultivo anual, forraje y frutal Con aplicación de Cropwat 8.0 – FAO – Tambillo (3250m.s.n.m.) – Ayacucho. V Congreso Nacional-IV Congreso Iberoamericano de riego y drenaje, Lima, Perú.

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.

[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

[DNP] Dirección Nacional de Planeación. 2010. Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014. Bogotá, Colombia: DNP.

Doorenbos, J. and W. O. Pruitt, 1977. *Crop Water Requirements*. FAO Irrig. And Drain. Paper 24, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. 156 pp.

Dorado-Guerra, D., Grajales-Guzmán, L., Rebolledo-Roa, A. 2017. Requerimientos hídricos de aguacate (*Persea americana*) variedad Hass en zonas productoras de Colombia. Mosquera, Colombia: [Corpoica] Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria.

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.

Faber B, Apaia M, Yates M. 1995. Irrigation management of avocado in a California coastal environment. Ponencia presentada en: World avocado Congress III. Israel.

Faber, B. 2006. Avocado irrigation in California. Presentado en seminario: Manejo del riego y suelo del cultivo del palto, INIA, La Cruz, Chile, 27-28 de septiembre de 2006, 5 pp. [consultado 2016 abr 3 2016].

http://www.avocadosource.com/Journals/INIA/INIA_Palta_FABER_PAPER.pdf

[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. 2007. Respuesta del rendimiento de árboles frutales y vides al agua: Aguacate. En P. Steduto; T. Hsiao; E. Fereres; D. Raes (Ed.), Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua, Estudio FAO Riego y Drenaje 66, pp: 449-455, Roma, Italia, FAO.

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.

Fischer, G., Shah, M., Tubiello, F.N., van Velthuisen, H. 2005. Socio-economic and climate change impacts on agriculture: an integrated assessment, 1990–2080, Philos. Trans. R. Soc. B 360 (1463) (2005) 2067–2083.

Gardiazabal, F., Magdahl, C., Mena, F., Wilhelmy, C. 2007. Determinación del coeficiente del cultivo (Kc) para paltos cv. Hass en Chile. Proceedings V World Avocado Congress (Actas V Congreso Mundial del Aguacate) 2003. pp. 329-334

Gorantiwar, S. D., Smouth, I. K. 2005 *Performance assessment of irrigation water management of heterogeneous irrigation schemes: 1. A framework for evaluation*. Irrigation and Drainage Systems 19: 1 – 36.

Holdridge, L.R. 1967. Life Zone Ecology. Rev. ed. San José, Costa Rica. Tropical Science Center

[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 [Fecha consulta: 03 de agosto de 2015]

[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/

[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.

Jensen, M.E., Burman R.D., and Allen R.G.. 1971. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE-Manuals and Reports on Engineering Practice, N° 70.

Jimenez, H., 1992. Hidrología Básica. Universidad del Valle. Cali. 100 pp.

Kiggundu, N., Migliaccio, K.W., Schaffer, B., Li, Y., Crane, J.H. 2012. Water savings, nutrient leaching, and fruit yield in a young avocado orchard as affected by irrigation and nutrient management. *Irrigation Science* 30:275–286.

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.

Kurtz, C., Gull, I. and Klein, I. 1992. Water rate effects on three avocado cultivars. In *Proceedings of the II World Avocado Congress, California, USA*, 357–364.

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.

Lahav, E., Steinhardt, R. and Kalmar, D. 1992. Water requirements and the effect of salinity in an avocado orchard on a clay soil. In Proceedings of the II World Avocado Congress, California, USA, 323–330.

Levine, G. 1982. *Relative Water Supply: An explanatory variable for irrigation systems*. Technical Report N°. 6. Cornell University. Ithaca, New York. EEUU.

Lovatt, C. 2010. Alternate Bearing Of 'Hass' Avocado. A summary of basic information to assist growers in managing their orchards. California Avocado Society Yearbook 93:125-140.

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.

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.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). 2006. Apuesta Exportadora Agropecuaria 2006 – 2020. Pp.40.

Molden, D.; Sakthivadivel, R.; Perry, C.J.; de Fraiture, C. Kloezen, W. 1998. Indicators for comparing performance of irrigated agricultural systems. Research report 20. International Water Management Institute. Colombo, Sri Lanka.

Molden, D., Oweis, T., Steduto, P., Bindraban, P., Hanjra, M.A., Kinje, J. 2009. Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution. *Agricultural Water Management*, Vol. 97, pp: 528–535

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, R.K. 1995. *Performance measure for improving irrigation management*. Irrigation and Drainage Systems 9: 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.

Ortíz, C. 1996. Análisis de la Evapotranspiración usando la ecuación de Penman-Monteith, Bajo Diferentes Condiciones Atmosféricas y Dos Niveles de Humedad en el Suelo. Tesis de Grado para Optar al Título de Ingr. Agrónomo, Esc. de Agronomía, Universidad de Talca.

Penman, H. L. 1963. *Vegetation and Hydrology*. Technical Communication 53 Commonwealth Bureau of Soils Harpenden. England. 123 pp.

Pérez U, L., Camacho P, E., Rodríguez D, J. A., López L, R. 2009. Gestión sostenible del agua de riego. Analistas económicos de Andalucía. Málaga, España.

Pérez, S.P. Castellví S.F. 2002. Análisis de la evapotranspiración a escala local y regional en Cataluña. Ingeniería del agua, ISSN 1134-2196, Vol. 9, Nº. 1, 2002 , pags. 59-72.

Perry, C.J., 1996. Quantification and measurement of a minimum set of indicators of the performance of irrigation systems. International Irrigation Management Institute, Colombo, Sri Lanka.

Perry, C., Steduto, P., Allen G, R., Burt, C. M. 2009. Increasing productivity in irrigated agriculture: Agronomic constraints and hydrological realities. Agricultural Water Management, Vol. 96, pp: 1517 – 1524.

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.

Rodríguez Nadales, J.R., 2002. Caracterización de la demanda de agua de riego en la zona regable del Genil-Cabra (sectores II-III y IV-VII). Trabajo profesional final. Universidad de Córdoba, Córdoba, España.

Rodríguez Díaz, J. A. 2004. Estudio de la gestión del agua de riego y aplicación de las técnicas de benchmarking a las zonas regables de Andalucía. Tesis doctoral. Universidad de Córdoba.

Rodríguez Díaz, J. A., Camacho-Poyato, E., Ibáñez-Verdú, M., Deltell Padilla, G. 2005. Análisis estacional y espacial del uso del agua en una zona regable. XXIV Congreso Nacional de Riegos. Elche. p. 241-242.

Roldan C, J., Pérez A, R. Díaz J, M., Moreno P, M. F. 2010. Mejora de la gestión del riego mediante el uso de indicadores de riego. Revista FCA UNCuyo. Tomo 42. N° 1. p: 107-124.

Salazar-García, S. 2002. Nutrición del Aguacate, Principios y Aplicaciones. Inifap IMPOFOS.163p.

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.

Slater, G.G., Shankman, S., Shepherd, J.S., y Alfin-Slater R.B., 1975. Variaciones estacionales de la composición de las paltas de California. *J. Agr. Food Chem.* 23:468-474.

Smith CE. 1966. Archeological evidence for selection in avocado. *Econ Bot.* 20(2):169-175.

Smith, M., Allen, R., Pereira, L. 1996. Revised FAO methodology for crop water requirements. Proc. Of ASAE International conference on evapotranspiration and irrigation Scheduling. San Antonio.

Smith, M. 2000. *Optimising crop production and crop water management under reduced water supply*. 6th Microirrigation Congress. South Africa.

Tafur, R., Toro, J.C., 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, L.M., Larios A., Salazar S. y Anguiano J. 2007. Efecto del clima y manejo de agua en el rendimiento y componentes del fruto de aguacate en Michoacan. Proceedings VI World Avocado Congress (Actas VI Congreso Mundial del Aguacate). Viña Del Mar, Chile. 12 – 16 Nov.

Thornthwaite, C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 38:55-94.

Uribe E, Mendieta JC, Rueda H, Carriazo F. 2003. Introducción a la valoración ambiental y estudios de caso. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes.

Velásquez J. 2009. 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. Secretaría de Productividad y Competitividad. Gobernación de Antioquia.

Williams LO. 1977. The avocados, a synopsis of the genus *Persea*, subg. *Persea*. *Econ Bot.* 31(3):315-320.

Whiley A. W, Chapman KR, Saranah JB. 1988. Water loss by floral structures of avocado (*Persea americana* cv. Fuerte) during flowering. *Aust JAgric Res.* 39:457-467.

Whiley, A. W.; Schafer, B. y Wolstenholme, B. N. (2002). *The Avocado Botany, production and uses*. CABI Publishing. (P. 416).

Wolters, W., Bos, M. G. 1990. *Irrigation performance assessment and irrigation efficiency*. 1989 Annual report, International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen.

6. ANEXOS

Anexo 1. Base de datos para balance hídrico y cálculo de lámina de riego

Día	Mes	Año	ET _o (mm)	Lamina	Kc	ET _c (mm/día)	Pe (mm)	BH (mm)	Riego (SI/NO)	Lamn (mm)	V (L)	T (min)
1	10	2013	3,7		1	3,7						
2	10	2013	4	3	1	4	0	4	si	4,4	17,8	6,7
3	10	2013	5,2	3	1	5,2	0	5,2	si	5,8	23,1	8,7
4	10	2013	4,4	3	1	4,4	0	4,4	no	0,0	0,0	0,0
5	10	2013	4,5	3	1	4,5	4,4	0,1	no	0,0	0,0	0,0
6	10	2013	5,2	3	1	5,2	0,8	4,4	no	0,0	0,0	0,0
7	10	2013	5	3	1	5	0	9,4	no	0,0	0,0	0,0
8	10	2013	4,8	3	1	4,8	0	14,2	si	15,8	63,1	23,7
9	10	2013	6,1	3	1	6,1	0	6,1	no	0,0	0,0	0,0
10	10	2013	5,1	3	1	5,1	0	11,2	si	12,4	49,8	18,7
11	10	2013	4,3	3	1	4,3	0	4,3	no	0,0	0,0	0,0
12	10	2013	4,1	3	1	4,1	35	-26,6	no	0,0	0,0	0,0

Anexo 2. Resultados de análisis de suelos, finca Los Arrayanes, Herveo

INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS DE SUELOS 44



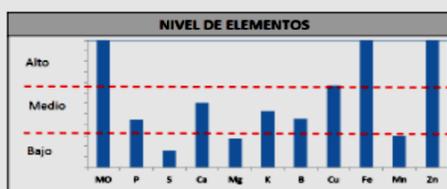
USUARIO: ALEXANDER REBOLLEDO VEREDA: NO INDICA TIPO DE ANÁLISIS: COMPLETO
 DIRECCIÓN: CORPOICA CI PALMIRA FINCA: NO INDICA ESTADO: ESTABLECIDO
 DEPARTAMENTO: TOLIMA ALTURA (msnm): 1978
 MUNICIPIO: HERVEO CULTIVO: AGUACATE



IDENTIFICACIÓN MUESTRA	CÓDIGO MUESTRA	PROFUNDIDAD (cm)	TEXTURA	pH	CE	Acidez			MO	P	S	Cationes extractables				Elementos Menores					
						AlH	Al	Sat de Al				Ca	Mg	K	Na	B	Cu	Fe	Mn	Zn	
						dS/m	cmol ⁺ kg ⁻¹	%				mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	
MUESTRA 1: 0-15 HERVEO	2293	0-15	FA	5,46	0,20	0,00	0,00	0,0%	31,46	20,9	4,0	4,31	0,83	0,26	0,03	5,43	0,23	2,60	104,0	3,80	8,20

RELACIONES CATIONICAS	VALOR	INTERPRETACIÓN GENERAL
Ca/Mg	3	Adecuado
Ca/K	16	Adecuado
Mg/K	3	deficiencia de Magnesio
Ca+Mg/K	20	deficiencia de Ca y Mg

SATURACIÓN CATIONICA	VALOR	INTERPRETACIÓN GENERAL
sat de Ca (%)	20,2%	ALTO
sat de Mg (%)	15,3%	MEJOR
sat de K (%)	4,0%	ALTO
sat de Na (%)	0,0%	NORMAL



MÉTODOS DE ANÁLISIS DE SUELO
 TEXTURA: Método orgánico
 pH: Potenciometría en solución agua 1:2,5
 MO: Materia orgánica método walkley & black
 P: Fósforo por el método de Murphy disponible NTC 5282
 S: Azufre disponible NTC 5282
 AlH: Acidez intercambiable NTC 5282
 Al: Conductividad eléctrica NTC 5282
 Na: Destilación de vapor con MgO y alación de devanda

FECHA DE ENTRADA: 22/04/2013 FECHA DE SALIDA: 06/05/2013
 VoBo DIRECTOR DE LABORATORIO: Yeri Rodríguez Giraldo - Química I. Esp. Planeación Ambiental

CORPOICA sede Tibaitatá, Mosquera Cundinamarca, Teléfono: 4227300 extensión 1414

Declaración 1: Los resultados de los análisis que se presentan sólo están relacionados con los códigos que se especifican en el presente informe.
 Declaración 2: Está prohibida la reproducción parcial de este informe de resultados sin la autorización escrita del laboratorio. Página 1 de 3

INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS DE SUELOS 44



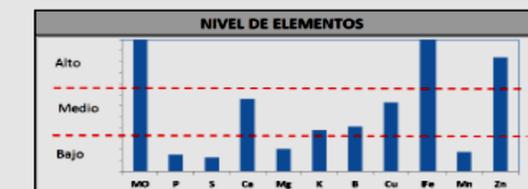
USUARIO: ALEXANDER REBOLLEDO VEREDA: NO INDICA TIPO DE ANÁLISIS: COMPLETO
 DIRECCIÓN: CORPOICA CI PALMIRA FINCA: NO INDICA ESTADO: ESTABLECIDO
 DEPARTAMENTO: TOLIMA ALTURA (msnm): 1978
 MUNICIPIO: HERVEO CULTIVO: AGUACATE



IDENTIFICACIÓN MUESTRA	CÓDIGO MUESTRA	PROFUNDIDAD (cm)	TEXTURA	pH	CE	Acidez			MO	P	S	Cationes extractables				Elementos Menores					
						AlH	Al	Sat de Al				Ca	Mg	K	Na	B	Cu	Fe	Mn	Zn	
						dS/m	cmol ⁺ kg ⁻¹	%				mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	
MUESTRA 2: 15-30 HERVEO	2294	15-30	FA	5,65	0,16	0,00	0,00	0,0%	9,00	7,3	3,2	4,75	0,62	0,19	0,03	5,50	0,21	2,10	110,0	2,20	3,90

RELACIONES CATIONICAS	VALOR	INTERPRETACIÓN GENERAL
Ca/Mg	8	deficiencia de Magnesio
Ca/K	23	Adecuado
Mg/K	3	deficiencia de Magnesio
Ca+Mg/K	26	Adecuado

SATURACIÓN CATIONICA	VALOR	INTERPRETACIÓN GENERAL
sat de Ca (%)	26,2%	ALTO
sat de Mg (%)	11,0%	BAJO
sat de K (%)	3,4%	ALTO
sat de Na (%)	0,0%	NORMAL



MÉTODOS DE ANÁLISIS DE SUELO
 TEXTURA: Método orgánico
 pH: Potenciometría en solución agua 1:2,5
 MO: Materia orgánica método walkley & black
 P: Fósforo por el método de Murphy disponible NTC 5282
 S: Azufre disponible NTC 5282
 AlH: Acidez intercambiable NTC 5282
 Al: Conductividad eléctrica NTC 5282
 Na: Destilación de vapor con MgO y alación de devanda

FECHA DE ENTRADA: 22/04/2013 FECHA DE SALIDA: 06/05/2013
 VoBo DIRECTOR DE LABORATORIO: Yeri Rodríguez Giraldo - Química I. Esp. Planeación Ambiental

CORPOICA sede Tibaitatá, Mosquera Cundinamarca, Teléfono: 4227300 extensión 1414

Declaración 1: Los resultados de los análisis que se presentan sólo están relacionados con los códigos que se especifican en el presente informe.
 Declaración 2: Está prohibida la reproducción parcial de este informe de resultados sin la autorización escrita del laboratorio. Página 2 de 3

Continuación Anexo 2. Resultados de análisis de suelos, finca Los Arrayanes, Herveo

INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS DE SUELOS 44

RESULTADO ANÁLISIS LABORATORIO QUÍMICA DE SUELOS



USUARIO: ALEXANDER REBOLLEDO VEREDA: NO INDICA TIPO DE ANÁLISIS: COMPLETO

DIRECCIÓN: CORPOICA CI PALMIRA FINCA: NO INDICA

DEPARTAMENTO: TOLIMA ALTURA (msnm): 1978 ESTADO: ESTABLECIDO

MUNICIPIO: HERVEO CULTIVO: ACUICATE



IDENTIFICACIÓN MUESTRA	CÓDIGO MUESTRA	PROFUNDIDAD (cm)	TEXTURA	pH	CE	Ácidos			MO	P	S	Cationes extraíbles				CCE	Elementos Menores					
						AlH	Al	Sat de Al				Ca	Mg	K	Na		B	Cu	Fe	Mn	Zn	
						dl/m	cmol _c /kg ¹	%														cmol _c /kg ¹
MUESTRA 3: 30 - 45 HERVEO	2295	30 - 45	FA	5,88	0,11	0,00	0,00%	6,73	8,5	4,0	3,78	0,46	0,16	0,03	4,43	0,16	2,10	71,9	1,00	1,60		
INTERPRETACIÓN GENERAL			Frango-Arenoso	INTERCAMBIABLE ACID	NO SALINO			ALTO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	

RELACIONES CATIONICAS	VALOR	INTERPRETACIÓN GENERAL
Ca/Mg	3	deficiencia de Magnesio
Ca/K	18	abundante
Mg/K	3	deficiencia de Magnesio
Ca/Mg/K	27	abundante

SATURACIÓN CATIONICA	VALOR	INTERPRETACIÓN GENERAL
sat de Ca (%)	85,8%	ALTO
sat de Mg (%)	39,6%	BAJO
sat de K (%)	3,5%	ALTO
sat de Na (%)	0,6%	NORMAL



MÉTODOS DE ANÁLISIS DE SUELO

TEXTURA: Método orgánico (Ca, Magnesio (Mg), Potasio (K) y Sodio (Na)) Método de acetato de amonio (N) pH 7

pH: Potenciometría relación suelo-agua 1:2,5

MO: Materia orgánica método walkley & Black

P: Fósforo por el método de Bray II

S: Azufre disponible NTC 5049

Ca: Análisis intercatiónico NTC 5249

Mg: Análisis intercatiónico NTC 5249

K: Conductividad eléctrica NTC 5046

Na: Destilación de vapor con MgCl₂ y reacción de devanda

Cationes extraíbles: Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Potasio (K) y Sodio (Na) Método de acetato de amonio (N) pH 7

CCE: Capacidad de Intercambio Cationico (Directa) método NTC 5248.

Elementos menores: Cobalto (Co), Hierro (Fe), Manganeso (Mn) y Zinc (Zn): Método de Olan modificado

B: Borro NTC 5046

FECHA DE ENTRADA: 22/04/2013

FECHA DE SALIDA: 06/05/2013

VoBo DIRECTOR DE LABORATORIO: 
Yeni Rodríguez Giraldo - Química I Exp. Planificación Ambiental

CORPOICA sede Tibatutá, Mosquera Cundinamarca, Telefono: 4227300 extensión 1414

Anexo 3. Resultados de análisis de suelos, finca El Recuerdo, Morales

INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS DE SUELOS 52

RESULTADO ANÁLISIS LABORATORIO QUÍMICA DE SUELOS



USUARIO: ALEXANDER REBOLLEDO VEREDA: Carpiñero TIPO DE ANÁLISIS: COMPLETO

DIRECCIÓN: CORPOICA CI PALMIRA FINCA: El Recuerdo

DEPARTAMENTO: CAUCA ALTURA (msnm): 1800 ESTADO: ESTABLECIDO

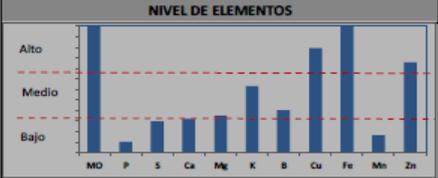
MUNICIPIO: MORALES CULTIVO: ACUICATE HASS



IDENTIFICACIÓN MUESTRA	CÓDIGO MUESTRA	PROFUNDIDAD (cm)	TEXTURA	pH	CE	Ácidos			MO	P	S	Cationes extraíbles				CCE	Elementos Menores					
						AlH	Al	Sat de Al				Ca	Mg	K	Na		B	Cu	Fe	Mn	Zn	
						dl/m	cmol _c /kg ¹	%														cmol _c /kg ¹
MUESTRA 1: 0 - 15 MORALES	2308	0 - 15	FA	5,33	0,33	0,38	0,26	6,5%	17,14	4,8	7,3	2,30	1,05	0,32	0,04	4,08	0,20	3,40	86,0	2,10	3,20	
INTERPRETACIÓN GENERAL			Frango-Arenoso	SUETA A ESTABILIZAMIENTO ACID	NO SALINO	NORMAL		ALTO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	ALTO	ALTO	BAJO	ALTO

RELACIONES CATIONICAS	VALOR	INTERPRETACIÓN GENERAL
Ca/Mg	3	deficiencia de Calcio
Ca/K	7	deficiencia de Calcio
Mg/K	3	deficiencia de Magnesio
Ca/Mg/K	11	deficiencia de Ca y Mg

SATURACIÓN CATIONICA	VALOR	INTERPRETACIÓN GENERAL
sat de Ca (%)	64,7%	ALTO
sat de Mg (%)	25,7%	ALTO
sat de K (%)	3,9%	ALTO
sat de Na (%)	0,9%	NORMAL



MÉTODOS DE ANÁLISIS DE SUELO

TEXTURA: Método orgánico (Ca, Magnesio (Mg), Potasio (K) y Sodio (Na)) Método de acetato de amonio (N) pH 7

pH: Potenciometría relación suelo-agua 1:2,5

MO: Materia orgánica método walkley & Black

P: Fósforo por el método de Bray II

S: Azufre disponible NTC 5049

Ca: Análisis intercatiónico NTC 5249

Mg: Análisis intercatiónico NTC 5249

K: Conductividad eléctrica NTC 5046

Na: Destilación de vapor con MgCl₂ y reacción de devanda

Cationes extraíbles: Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Potasio (K) y Sodio (Na) Método de acetato de amonio (N) pH 7

CCE: Capacidad de Intercambio Cationico (Directa) método NTC 5248.

Elementos menores: Cobalto (Co), Hierro (Fe), Manganeso (Mn) y Zinc (Zn): Método de Olan modificado

B: Borro NTC 5046

FECHA DE ENTRADA: 10/05/2013

FECHA DE SALIDA: 30/05/2013

VoBo DIRECTOR DE LABORATORIO: 
Yeni Rodríguez Giraldo - Química I Exp. Planificación Ambiental

CORPOICA sede Tibatutá, Mosquera Cundinamarca, Telefono: 4227300 extensión 1414

Declaración 1: Los resultados de los análisis que se presentan sólo están relacionados con los códigos que se especifican en el presente informe.

Continuación Anexo 3. Resultados de análisis de suelos, finca El Recuerdo, Morales

INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS DE SUELOS 52

RESULTADO ANÁLISIS LABORATORIO QUÍMICA DE SUELOS



USUARIO: ALEXANDER REBOLLEDO VEREDA: Carpiñero TIPO DE ANÁLISIS: COMPLETO

DIRECCIÓN: CORPOICA CI PALMITA FINCA: El Recuerdo

DEPARTAMENTO: CALICA ALTURA (mnm): 1500 ESTADO: ESTABLECIDO

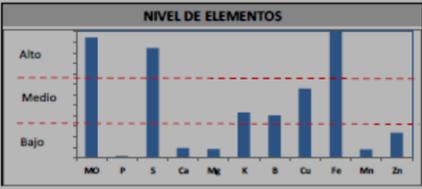
MUNICIPIO: MORALES CULTIVO: AGUACATE HASS



IDENTIFICACIÓN MUESTRA	CÓDIGO MUESTRA	PROFUNDIDAD (cm)	TEXTURA	pH	CE	Ácidos			MO	P	S	Cationes extraíbles				CEC	Elementos Menores				
						AlH	Al	Set de Al				Ca	Mg	K	Na		B	Cu	Fe	Mn	Zn
						ds/m	cmol _c /kg ⁺	%				mg/kg ⁺	mg/kg ⁺	mg/kg ⁺	mg/kg ⁺		mg/kg ⁺	mg/kg ⁺	mg/kg ⁺	mg/kg ⁺	
MUESTRA 3: 30 - 45 MORALES	2310	30 - 45	FA	5,67	0,09	0,00	0,00	0,00	6,80	0,8	25,5	0,63	0,28	0,21	0,03	1,13	0,20	2,20	114,0	1,00	0,90
INTERPRETACIÓN GENERAL Fuente: Manual de agricultura básica NP 25, Fertilización en diversos cultivos. Química Agronómica.			Friego-Arenoso	NEUTRALMENTE ACIDO	NO SALINO				ALTO	BAJO	ALTO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO

RELACIONES CATIONICAS	VALOR	INTERPRETACIÓN GENERAL
Ca/Mg	2	deficiencia de Calcio
Ca/K	3	deficiencia de Calcio
Mg/N	1	deficiencia de Magnesio
C/Nitrógeno	8	deficiencia de C a N

SATURACIÓN CATIONICA	VALOR	INTERPRETACIÓN GENERAL
set de Ca (%)	10,0%	ALTO
set de Mg (%)	22,7%	BAJO
set de K (%)	18,0%	ALTO
set de Na (%)	0,0%	NORMAL



MÉTODOS DE ANÁLISIS DE SUELO

TEXTURA: Método organo-físico por tamizado y método punto-agua 12.5
MO: Materia orgánica método walkley & Black
M: Materia orgánica método walkley & Black
P: Fósforo por el método de la Acuflyte disponible NTC 5482
Mg: Magnesio por el método de la Acuflyte disponible NTC 5482
K: Potasio por el método de la Acuflyte disponible NTC 5482
S: Conductividad eléctrica NTC 5066
CE: Capacidad de intercambio catiónico método NTC 5066
N: Nitrógeno por el método de la Acuflyte disponible NTC 5482

FECHA DE ENTRADA: 10/05/2013

FECHA DE SALIDA: 30/05/2013

Vuho DIRECTOR DE LABORATORIO: 
Yari Rodríguez Orozco - Química I. Exp. Fisiología Ambiental

CORPOICA sede Tibaitará, Mosquera Cundinamarca, Teléfono: 4227300 extensión 1414

INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS DE SUELOS 52

RESULTADO ANÁLISIS LABORATORIO QUÍMICA DE SUELOS



USUARIO: ALEXANDER REBOLLEDO VEREDA: Carpiñero TIPO DE ANÁLISIS: COMPLETO

DIRECCIÓN: CORPOICA CI PALMITA FINCA: El Recuerdo

DEPARTAMENTO: CALICA ALTURA (mnm): 1500 ESTADO: ESTABLECIDO

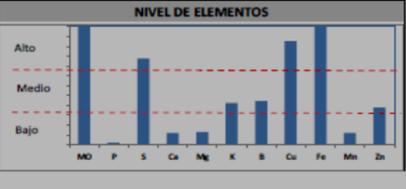
MUNICIPIO: MORALES CULTIVO: AGUACATE HASS



IDENTIFICACIÓN MUESTRA	CÓDIGO MUESTRA	PROFUNDIDAD (cm)	TEXTURA	pH	CE	Ácidos			MO	P	S	Cationes extraíbles				CEC	Elementos Menores				
						AlH	Al	Set de Al				Ca	Mg	K	Na		B	Cu	Fe	Mn	Zn
						ds/m	cmol _c /kg ⁺	%				mg/kg ⁺	mg/kg ⁺	mg/kg ⁺	mg/kg ⁺		mg/kg ⁺	mg/kg ⁺	mg/kg ⁺	mg/kg ⁺	
MUESTRA 2: 15 - 30 MORALES	2309	15 - 30	FA	5,45	0,15	0,00	0,00	0,00	13,13	1,1	21,4	0,81	0,39	0,21	0,04	1,45	0,22	3,60	114,0	1,50	1,40
INTERPRETACIÓN GENERAL Fuente: Manual de agricultura básica NP 25, Fertilización en diversos cultivos. Química Agronómica.			Friego-Arenoso	FUERTE A EXTREMAMENTE ACIDO	NO SALINO				ALTO	BAJO	ALTO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO

RELACIONES CATIONICAS	VALOR	INTERPRETACIÓN GENERAL
Ca/Mg	2	deficiencia de Calcio
Ca/K	4	deficiencia de Calcio
Mg/N	2	deficiencia de Magnesio
C/Nitrógeno	6	deficiencia de C a N

SATURACIÓN CATIONICA	VALOR	INTERPRETACIÓN GENERAL
set de Ca (%)	10,0%	ALTO
set de Mg (%)	25,0%	ALTO
set de K (%)	18,0%	ALTO
set de Na (%)	0,0%	NORMAL



MÉTODOS DE ANÁLISIS DE SUELO

TEXTURA: Método organo-físico por tamizado y método punto-agua 12.5
MO: Materia orgánica método walkley & Black
M: Materia orgánica método walkley & Black
P: Fósforo por el método de la Acuflyte disponible NTC 5482
Mg: Magnesio por el método de la Acuflyte disponible NTC 5482
K: Potasio por el método de la Acuflyte disponible NTC 5482
S: Conductividad eléctrica NTC 5066
CE: Capacidad de intercambio catiónico método NTC 5066
N: Nitrógeno por el método de la Acuflyte disponible NTC 5482

FECHA DE ENTRADA: 10/05/2013

FECHA DE SALIDA: 30/05/2013

Vuho DIRECTOR DE LABORATORIO: 
Yari Rodríguez Orozco - Química I. Exp. Fisiología Ambiental

CORPOICA sede Tibaitará, Mosquera Cundinamarca, Teléfono: 4227300 extensión 1414

Anexo 4. Resultados de análisis de suelos, finca La Escondida, Rionegro

INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS DE SUELOS __51__

RESULTADO ANÁLISIS LABORATORIO QUÍMICA DE SUELOS



USUARIO: ALEXANDER REBOLLEDO VEREDA: NO INDICA TIPO DE ANÁLISIS: COMPLETO

DIRECCIÓN: CORPOICA CI PALMIRA FINCA: NO INDICA

DEPARTAMENTO: ANTIOQUIA ALTURA (msnm): 1978 ESTADO: ESTABLECIDO

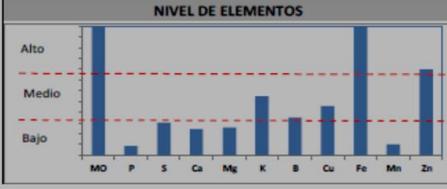
MUNICIPIO: RIONEGRO CULTIVO: AGUACATE



IDENTIFICACIÓN MUESTRA	CÓDIGO MUESTRA	PROFUNDIDAD (cm)	TEXTURA	pH	CE	Acidez			MO	P	S	Cationes extraerctables				CIC	Elementos Menores					
						AlH	Al	Sat de Al				Ca	Mg	K	Na		B	Cu	Fe	Mn	Zn	
						dS/m	cmol _c /kg ⁻¹	%				%	mg/kg ⁻¹	cmol _c /kg ⁻¹	mg/kg ⁻¹		mg/kg ⁻¹					
MUESTRA 1: RIONEGRO D. 15 BAJA	2302	0-15	L	5,5	0,15	0,00	0,00	0,0%	19,81	4,3	7,4	1,71	0,78	0,28	0,07	2,83	0,18	1,50	300,0	1,30	3,00	
INTERPRETACIÓN GENERAL: Fuente: Manual de adonada técnica NP 25. Fertilización en diversos cultivos. Quinta Aproximación.						Limonoso	MODERADAMENTE ACIDO	NO SALINO		ALTO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO

RELACIONES CATIONICAS	VALOR	INTERPRETACIÓN GENERAL
Ca/Na	2	deficiencia de Calcio
Ca/S	6	deficiencia de Calcio
Mg/S	3	deficiencia de Magnesio
Ca+Mg/S	9	deficiencia de Ca o Mg

SATURACIÓN CATIONICA	VALOR	INTERPRETACIÓN GENERAL
sat. de Ca (%)	80,4%	ALTO
sat. de Mg (%)	27,0%	ALTO
sat. de K (%)	0,7%	ALTO
sat. de Na (%)	0,3%	NORMAL



MÉTODOS DE ANÁLISIS DE SUELO

TEXTURA: Método organolítico
 pH: Potenciometría relación suelo-agua 1:2,5
 MO: Materia orgánica método walkley & Black
 P: Fósforo por el método de Bray II
 S: Azufre disponible NTC 5402
 AlH: Ácidos intercambiables NTC 5203
 CI: Conductividad eléctrica NTC 5596
 ND: Destilación de vapor con MgO y aleación de devanda

Cationes de cambio Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Potasio (K) y Sodio (Na): Método de acetato de amonio 2N pH 7
 CIC: Capacidad de Intercambio Cationico Directa método NTC 5206
 Elementos menores Calcio (Ca), Hierro (Fe), Magnesio (Mg) y Zinc (Zn): Método de Olan modificado
 B: Boro NTC 5404

FECHA DE ENTRADA 03/05/2013

FECHA DE SALIDA 17/05/2013

VoBo DIRECTOR DE LABORATORIO: 
Yeni Rodríguez Granda - Química I. Esp. Planeación Ambiental

CORPOICA sede Tibaitatá, Mosquera Cundinamarca, Telefono: 4227300 extensión 1414

INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS DE SUELOS __51__

RESULTADO ANÁLISIS LABORATORIO QUÍMICA DE SUELOS



USUARIO: ALEXANDER REBOLLEDO VEREDA: NO INDICA TIPO DE ANÁLISIS: COMPLETO

DIRECCIÓN: CORPOICA CI PALMIRA FINCA: NO INDICA

DEPARTAMENTO: ANTIOQUIA ALTURA (msnm): 1978 ESTADO: ESTABLECIDO

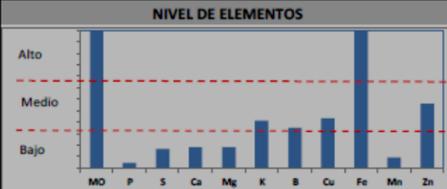
MUNICIPIO: RIONEGRO CULTIVO: AGUACATE



IDENTIFICACIÓN MUESTRA	CÓDIGO MUESTRA	PROFUNDIDAD (cm)	TEXTURA	pH	CE	Acidez			MO	P	S	Cationes extraerctables				CIC	Elementos Menores				
						AlH	Al	Sat de Al				Ca	Mg	K	Na		B	Cu	Fe	Mn	Zn
						dS/m	cmol _c /kg ⁻¹	%				%	mg/kg ⁻¹	cmol _c /kg ⁻¹	mg/kg ⁻¹		mg/kg ⁻¹				
MUESTRA 2: RIONEGRO 1.5-30	2303	15-30	L	5,45	0,17	0,00	0,00	0,0%	16,97	2,2	4,1	1,26	0,54	0,21	0,07	2,08	0,18	1,40	268,0	1,20	2,10
INTERPRETACIÓN GENERAL: Fuente: Manual de adonada técnica NP 25. Fertilización en diversos cultivos. Quinta Aproximación.						Limonoso	FUERTA A EXTREMADAMENTE ACIDO	NO SALINO		ALTO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO

RELACIONES CATIONICAS	VALOR	INTERPRETACIÓN GENERAL
Ca/Na	2	deficiencia de Calcio
Ca/S	6	deficiencia de Calcio
Mg/S	3	deficiencia de Magnesio
Ca+Mg/S	9	deficiencia de Ca o Mg

SATURACIÓN CATIONICA	VALOR	INTERPRETACIÓN GENERAL
sat. de Ca (%)	80,0%	ALTO
sat. de Mg (%)	26,0%	ALTO
sat. de K (%)	0,0%	ALTO
sat. de Na (%)	0,3%	NORMAL



MÉTODOS DE ANÁLISIS DE SUELO

TEXTURA: Método organolítico
 pH: Potenciometría relación suelo-agua 1:2,5
 MO: Materia orgánica método walkley & Black
 P: Fósforo por el método de Bray II
 S: Azufre disponible NTC 5402
 AlH: Ácidos intercambiables NTC 5203
 CI: Conductividad eléctrica NTC 5596
 ND: Destilación de vapor con MgO y aleación de devanda

Cationes de cambio Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Potasio (K) y Sodio (Na): Método de acetato de amonio 2N pH 7
 CIC: Capacidad de Intercambio Cationico Directa método NTC 5206
 Elementos menores Calcio (Ca), Hierro (Fe), Magnesio (Mg) y Zinc (Zn): Método de Olan modificado
 B: Boro NTC 5404

FECHA DE ENTRADA 03/05/2013

FECHA DE SALIDA 17/05/2013

VoBo DIRECTOR DE LABORATORIO: 
Yeni Rodríguez Granda - Química I. Esp. Planeación Ambiental

CORPOICA sede Tibaitatá, Mosquera Cundinamarca, Telefono: 4227300 extensión 1414

Continuación Anexo 4. Resultados de análisis de suelos, finca La Escondida, Rionegro

INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS DE SUELOS 51

RESULTADO ANÁLISIS LABORATORIO QUÍMICA DE SUELOS



Corpoica
Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria

USUARIO: ALEXANDER REBOLLEDO VEREDA: NO INDICA TIPO DE ANÁLISIS: COMPLETO

DIRECCIÓN: CORPOICA CI PALMIRA FINCA: NO INDICA

DEPARTAMENTO: ANTIOQUIA ALTURA (msnm): 1978 ESTADO: ESTABLECIDO

MUNICIPIO: RIONEGRO CULTIVO: AGUACATE



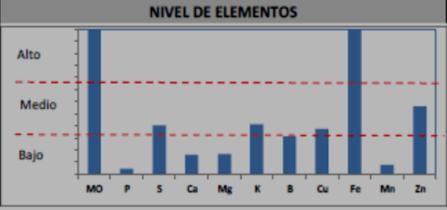
LISSALAB
QUÍMICA DE SUELOS Y AGUAS

IDENTIFICACIÓN MUESTRA	CÓDIGO MUESTRA	PROFUNDIDAD (cm)	TEXTURA	pH	CE				MO	P	S	Cationes extractables						Elementos Menores					
					Acidez		MO	P				S	Ca	Mg	K	Na	Cl	B	Cu	Fe	Mn	Zn	
					AlHt	Al																	Set de Al
MUESTRA 3: RIONEGRO 30-45	2304	30 - 45	FA	5,49	0,12	0,00	0,00	0,0%	13,68	2,2	9,9	1,13	0,50	0,21	0,07	1,91	0,16	1,20	270,0	1,00	2,10		
<p>INTERPRETACIÓN GENERAL Fuente: Manual de asistencia técnica N° 25. Fertilización en diversos cultivos. Oficina Agronomía</p> <p>Francisco-Arenoso FUENTE A ESTIMANDAMIENTOS ACIDIO NO SALINO ALTO BAJO BAJO BAJO BAJO MEDIO NORMAL BAJO BAJO MEDIO ALTO BAJO MEDIO</p>																							

RELACIONES CATIONICAS	VALOR	INTERPRETACIÓN GENERAL
Ca/Mg	2	deficiencia de Calcio
Ca/S	5	deficiencia de Calcio
Mg/S	7	deficiencia de Magnesio
(Ca+Mg)/S	9	deficiencia de Ca & Mg

SATURACIÓN CATIONICA	VALOR	INTERPRETACIÓN GENERAL
sat. de Ca (%)	39,3%	ALTO
sat. de Mg (%)	25,3%	ALTO
sat. de S (%)	33,2%	ALTO
sat. de Na (%)	3,2%	NORMAL

NIVEL DE ELEMENTOS



MÉTODOS DE ANÁLISIS DE SUELO

<p>TEXTURA: Método organoléptico</p> <p>pH: Potenciometría relación suelo-agua 1:2,5</p> <p>MO: Materia orgánica método walkley & black</p> <p>P: Fósforo por el método de Bray II</p> <p>S: Azufre disponible NTC 5402</p> <p>Al-Ht: Ácidos intercambiables NTC 5203</p> <p>CE: Conductividad eléctrica NTC 5006</p> <p>NO₃: Destilación de vapor con NaOH y alación de devanda</p>	<p>Cationes de cambio Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Potasio (K) y Sodio (Na): Método de acetato de amonio 2M pH 7</p> <p>Cl: Capacidad de Intercambio Cationico Directiva método NTC 5206</p> <p>Elementos menores Cobres (Cu), Hierro (Fe), Manganeso (Mn) y Zinc (Zn): Método de Oltan modificado</p> <p>B: Boro NTC 5604</p>
---	---

FECHA DE ENTRADA 09/05/2013

FECHA DE SALIDA 17/05/2013

VoBo DIRECTOR DE LABORATORIO: 
Yeni Rodriguez Giraldo - Química I. Esp. Planeación Ambiental

CORPOICA sede Tibatotá, Mosquera Cundinamarca, Telefono: 4227300 extensión 1414