

**DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA CURVA DEL COEFICIENTE DE CULTIVO (K_c) PARA
EL CULTIVO DE CÚRCUMA (*Cúrcuma Longa*) EN EL CORREGIMIENTO “EL LIMONAR” DEL
MUNICIPIO DE DAGUA, VALLE DEL CAUCA**

MANUEL ALEJANDRO RIOS RIVERA



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
GRUPO DE INVESTIGACIÓN “REGAR”
2015**

**DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA CURVA DEL COEFICIENTE DE CULTIVO (K_c) PARA
EL CULTIVO DE CÚRCUMA (*Cúrcuma Longa*) EN LA VEREDA “EL LIMONAR” DEL MUNICIPIO
DE DAGUA, VALLE DEL CAUCA**

MANUEL ALEJANDRO RIOS RIVERA

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar el título de
Ingeniero Agrícola**

DIRECTOR

**Ph.D NORBERTO URRUTIA COBO
INGENIERO AGRÍCOLA**

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE

PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

2015

NOTA DE APROBACIÓN

FIRMA DIRECTOR

FIRMA JURADO

FIRMA JURADO

DEDICATORIA

A mis padres, **Antonio Rios** y **Martha Rivera**, por su apoyo constante, amor incondicional y el inmenso esfuerzo que hicieron para permitirme llegar hasta aquí.

A mis hermanas, **Paula Rios** y **Mónica Rios**, por sus consejos, por su inmenso apoyo y cariño y por estar siempre pendientes de mí.

A mis amigos, compañeros, y todos aquellos que de una u otra forma contribuyeron a mi anhelada meta profesional.

Al equipo de Rugby **Lobos Univalle**, que me enseñó que sin importar cuál sea la adversidad, siempre hay que levantar la cabeza e ir para adelante.

AGRADECIMIENTOS

Al grupo de investigación **REGAR** de la Universidad del Valle, por permitirme hacer parte de este proyecto y por los conocimientos adquiridos durante la duración del mismo.

Al profesor **Norberto Urrutia**, por recibirme como uno más de sus tesisistas, por sus consejos y conocimientos que me servirán durante mi vida profesional.

Al ingeniero **Cristo Pérez** y al profesor **Andrés Echeverri** que con su colaboración contribuyeron al desarrollo de este trabajo.

A mi familia por su apoyo incondicional en los momentos más difíciles, que me permitió siempre seguir adelante.

Finalmente a la señora **Lucy Stella Escobar** y a la Asociación **Agroecol**, pues sin su invaluable colaboración este trabajo no hubiese sido posible.

Tabla de contenido

1	RESUMEN.....	1
2	INTRODUCCIÓN.....	2
3	OBJETIVOS	4
3.1	Objetivo general.....	4
3.2	Objetivos específicos	4
4	MARCO TEÓRICO	5
4.1	Generalidades del Cultivo	5
4.1.1	Origen	5
4.1.2	Descripción	5
4.1.3	Cultivo.....	7
4.1.4	Requerimientos edafoclimáticos.....	8
4.1.5	Labores culturales.....	8
4.1.6	Fertilización.....	9
4.1.7	Riego	9
4.1.8	Cosecha y recolección	10
4.2	El cultivo de la Cúrcuma en Colombia.....	10
4.2.1	Producción por departamentos	10
4.2.2	Exportaciones	11
4.3	Evapotranspiración (ET)	11
4.3.1	Evapotranspiración	11
4.3.2	Evapotranspiración del cultivo de Referencia (ET _o)	13
4.3.3	Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET _c)	14
4.3.4	Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET _{c aj}).....	15
4.4	Determinación de la evapotranspiración (ET).....	17
4.4.1	Balance de Agua en el suelo.....	17
4.4.2	Lisímetros	18
4.4.3	Determinación de ET _o a partir de datos climatológicos (Método FAO Penman-Monteith)	19
4.4.4	Curva de retención de Humedad del Suelo	21

4.4.5	Medición del contenido de humedad del suelo in situ	24
4.5	Coeficiente de cultivo (Kc)	25
4.5.1	Factores que determinan el coeficiente de cultivo	26
4.5.2	Curva del Coeficiente de cultivo	27
5	METODOLOGÍA	28
5.1	Localización – Área de estudio	28
5.2	Contextualización del proyecto	30
5.3	Determinación de Evapotranspiración	31
5.3.1	Determinación de la evapotranspiración de cultivo (ETc)	31
5.3.2	Determinación de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo)	45
5.4	Determinación de la curva del coeficiente de cultivo (Kc)	47
5.5	Determinación de la necesidad de riego neta (NRn) y total (NRt)	47
5.6	Análisis estadístico.	47
6	ANÁLISIS Y RESULTADOS	48
6.1	Análisis de suelo	48
6.1.1	Textura, porosidad y densidad aparente	48
6.1.2	Capacidad de Campo	49
6.1.3	Curva de retención de humedad	51
6.2	Evapotranspiración del cultivo (ETc)	56
6.2.1	Volumen de riego aplicado en los lisímetros	56
6.2.2	Calculo de la ETc	56
6.3	Evapotranspiración de Referencia (ETo)	61
6.4	Curva del coeficiente de cultivo (Kc)	62
6.5	Necesidades de riego netas y totales para la Cúrcuma	65
7	CONCLUSIONES	66
8	RECOMENDACIONES	67
9	BIBLIOGRAFIA	68
10	ANEXOS	72
10.1	ANEXO A	72
10.1.1	1RA ETAPA	72

10.1.2	2DA ETAPA.....	74
10.1.3	3RA ETAPA.....	77
10.2	ANEXO B.....	80
10.3	ANEXO C.....	83
10.4	ANEXO D.....	84
10.5	ANEXO E.....	88

Índice de Tablas

Tabla 1. Participación nacional en la producción de cúrcuma	10
Tabla 2. Exportaciones para Colombia en miles de dólares de diferentes especias	11
Tabla 3. Fórmula de la primera fertilización realizada a la cúrcuma.	44
Tabla 4. Fórmula aplicada en Drench	45
Tabla 5. Fórmula de aplicación foliar	45
Tabla 6. Resultados de la caracterización del suelo	49
Tabla 7. Valores de capacidad de campo para las 6 muestras tomadas en los lisímetros	50
Tabla 8. Estadísticos de la variable “Capacidad de Campo” (%)	50
Tabla 9. Parámetros físicos utilizados para la generación de la curva de retención para el lisímetro 1.	51
Tabla 10. Parámetros físicos utilizados para la generación de la curva de retención para el lisímetro 2	53
Tabla 11. Parámetros físicos utilizados para la generación de la curva de retención para el lisímetro 3	54
Tabla 12. Estadísticos de la ETc en los 3 lisímetros [mm/día]	57
Tabla 13. Resultados de la prueba de Friedman	59
Tabla 14. Comparación entre lisímetros	59
Tabla 15. Estadísticos de la variable “Evapotranspiración de referencia” [mm/día].	61
Tabla 16. Variables climáticas medidas con la estación portátil, ETo media mensual y ETo mensual total.	61
Tabla 18. Tabla de riego para el lisímetro 1 en la 1ra etapa de la investigación.	72
Tabla 19. Tabla de riego para el lisímetro 2 en la 1ra etapa de la investigación.	73
Tabla 20. Tabla de riego para el lisímetro 3 en la 1ra etapa de la investigación.	73
Tabla 21. Tabla de riego para el lisímetro 1 en la 2da etapa de la investigación.	74
Tabla 22. Tabla de riego para el lisímetro 2 en la 2da etapa de la investigación	75
Tabla 23. Tabla de riego para el lisímetro 3 en la 2da etapa de la investigación	76
Tabla 24. Tabla de riego para el lisímetro 1 en la 3ra etapa de la investigación	77
Tabla 25. Tabla de riego para el lisímetro 2 en la 3ra etapa de la investigación	78
Tabla 26. Tabla de riego para el lisímetro 3 en la 3ra etapa de la investigación	79
Tabla 27. Valores de la curva de retención de humedad para el lisímetro 1 en diferentes unidades de tensión	80
Tabla 28. Valores de la curva de retención de humedad para el lisímetro 2 en diferentes unidades de tensión	81
Tabla 29. Valores de la curva de retención de humedad para el lisímetro 3 en diferentes unidades de tensión	82
Tabla 30. Volúmenes de riego aplicados en cada lisímetro	83
Tabla 31. Evapotranspiración del cultivo diaria para cada uno de los lisímetros a lo largo de la investigación	84

Tabla 32. Evapotranspiración de referencia	87
Tabla 33. Valores de Kc cálculos a partir de la relación ETc/ETo	88

Índice de Figuras

Figura 1. Flor de la cúrcuma	6
Figura 2. Rizomas de la cúrcuma. (Fuente: http://www.infojardin.com)	7
Figura 3. Efecto combinado de la evaporación y transpiración en un cultivo. Fuente: Allen <i>et al.</i> (2006)	12
Figura 4. Esquema de la Evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo). Fuente: Allen <i>et al.</i> (2006)	14
Figura 5. Esquematización de la ETc bajo condiciones estándar. Fuente: Allen <i>et al.</i> (2006)	15
Figura 6. Balance de agua en la zona radicular. Fuente: Allen <i>et al.</i> (2006)	16
Figura 7. Esquematización de la ETc bajo condiciones no estándar. Fuente: Allen <i>et al.</i> (2006)	17
Figura 8. Balance de agua en el suelo. Fuente: Allen <i>et al.</i> (2006)	17
Figura 9. Curva de retención de humedad del suelo. Fuente: Jaramillo (2002)	22
Figura 10. Tensiómetro de manómetro	24
Figura 11. Sonda TDR. Fuente: www.sbk-mexico.com	25
Figura 12. Curva del coeficiente de cultivo. Fuente: Allen <i>et al.</i> (2006)	28
Figura 13. Mapa de Localización Dagua, Valle del Cauca. Fuente: www.dagua-valle.gov.co/	29
Figura 14. Levantamiento topográfico del área donde se realizó el estudio. Fuente: Grupo de investigación ILAMA - Univalle	30
Figura 15. Esquema del Lisímetro y Componentes	32
Figura 16. Vistas del Lisímetro y dimensiones en centímetros.	33
Figura 17. Base del lisímetro	34
Figura 18. Lisímetros usados en la investigación.	34
Figura 19. Ubicación de lisímetros en el predio	35
Figura 20. Tensiómetros instalados en el lisímetro	36
Figura 21. Toma de muestras de suelo en los lisímetros	37
Figura 22. Muestras de suelo a saturación sobre la mesa de tensión	37
Figura 23. Muestra de suelo pesada en la balanza	38
Figura 24. Esquema de la realización de una curva mediante RETC	39
Figura 25. Factores considerados en el cambio en el contenido de humedad del suelo.	40
Figura 26. Esquema del volumen a humedecer alrededor de la planta.	41
Figura 27. Profundidad radicular en la etapa 2 de riego	42
Figura 28. Profundidad radicular en la etapa 3 de riego	43
Figura 29. Esquema de una estación climatológica portátil. Fuente: http://ag.arizona.edu/pubs/water/az1194.pdf	46
Figura 30. Puntos de muestreo de suelo	49

Figura 31. Curva de retención de humedad para el lisímetro 1 generada a partir del modelo de Van Genutchen (1980) con tensión en atmósferas.....	52
Figura 32. Curva de retención de humedad para el lisímetro 1 generada a partir del modelo de Van Genutchen (1980) con tensión en centibares.....	52
Figura 33. Curva de retención de humedad para el lisímetro 2 generada a partir del modelo de Van Genutchen (1980) con tensión en atmósferas.....	53
Figura 34. Curva de retención de humedad para el lisímetro 2 generada a partir del modelo de Van Genutchen (1980) con tensión en centibares.....	54
Figura 35. Curva de retención de humedad para el lisímetro 3 generada a partir del modelo de Van Genutchen (1980) con tensión en atmósferas	55
Figura 36. Curva de retención de humedad para el lisímetro 3 generada a partir del modelo de Van Genutchen (1980) con tensión en centibares.....	55
Figura 37. Curvas de retención de humedad para los 3 lisímetros con tensión en atmósferas.....	56
Figura 38. Prueba de normalidad (Test de Shapiro – Wilk)	58
Figura 39. Prueba de homocedasticidad (Test de Levene)	59
Figura 40. Evapotranspiración del cultivo promediada a partir de los resultados obtenidos en los lisímetros 2 y 3.	60
Figura 41. Comparación entre la precipitación y la evapotranspiración de referencia (ET _o).....	62
Figura 42. Valores de K _c determinados para cada lisímetro para periodos de 5 días.	63
Figura 43. Curvas de K _c de los 3 lisímetros suavizada mediante Splines.	64
Figura 44. Curva del coeficiente de cultivo de la cúrcuma e intervalos de confianza.	64
Figura 45. Relación entre la precipitación efectiva y la ET _c para el cálculo de la necesidad de riego neta para periodos de 5 días a lo largo de la investigación.	65

1 RESUMEN

En Colombia, el cultivo de cúrcuma ha tenido poca investigación con relación a sus requerimientos hídricos, lo que imposibilita el uso eficiente del recurso hídrico en su producción, pues aún se desconoce la curva que describe el coeficiente de cultivo. La siguiente investigación pretende determinar experimentalmente la curva del coeficiente de cultivo para la cúrcuma. El experimento fue llevado a cabo en la vereda “Monterredondo”, corregimiento del “Limonar”, zona rural del municipio de Dagua, Valle del Cauca entre Octubre 21 de 2014 hasta el 8 de abril del 2015. La evapotranspiración del cultivo fue determinada mediante lisímetros de drenaje y la evapotranspiración de referencia mediante el método FAO Penman-Monteith. El valor máximo promedio para la evapotranspiración del cultivo fue de 5,16 mm/día entre los 83 y los 142 días después del trasplante (DDT); se tuvo un promedio de 3,76 mm/día para la evapotranspiración de referencia y un máximo de 5,20 mm/día. El valor del coeficiente de cultivo (K_c) tuvo un valor de 0,51 en la fase II de desarrollo de la planta (1 a 114 DDT), 1 en la fase III (115 y 135 DDT) y 0,38 en la fase IV (136 a 170 DDT). Considerando todo el periodo de estudio se determinaron valores de 0,11, 1,06 y 0,36 como $K_{c_{ini}}$, $K_{c_{med}}$ y $K_{c_{fin}}$ respectivamente.

2 INTRODUCCIÓN

Del total de agua en el mundo se estima que 2.5% corresponde a agua dulce, distribuida entre glaciares, agua subterránea, ríos y lagos. Actualmente las extracciones de agua para uso humano son de alrededor de 3.600 km³ de los cuales la agricultura consume aproximadamente un 69%, la cantidad restante se dispone en un 10% para consumo doméstico y 21% para la industria (FAO, 2002). Debido a que el agua es un recurso escaso, se hace imprescindible que su uso se haga de forma eficiente y responsable, más aún cuando se prevé que a lo largo de los años habrá una menor disponibilidad y distribución irregular en el mundo.

Según el IDEAM (2010) la demanda hídrica nacional alcanzó una magnitud de 35.788 Mm³, usados en los sectores Industrial, doméstico, energético, pecuario, acuícola, de servicios y agrícola; siendo este último el de mayor participación con un 54% (19.386 Mm³). En relación a la oferta, Colombia es un país privilegiado, puesto que la precipitación media y los caudales promedio superan los estándares de Suramérica y el mundo (Cely, 2010); sin embargo, debido a la variabilidad en la distribución del agua y a la realización de actividades de origen antrópico (como el riego en la agricultura) se hace necesaria la ejecución de acciones orientadas a la planificación y programación en el uso del agua, tanto a nivel urbano como rural.

Según Chaves *et al.* (2005) hay dos variables que son de extrema importancia para el éxito de la agricultura con irrigación: El buen dimensionamiento del sistema y el manejo del riego. Para esto es indispensable disponer de diferentes parámetros, entre los cuales se encuentran: La evapotranspiración del cultivo (ET_c), la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) y el coeficiente de cultivo (K_c), que dependen de las condiciones climáticas, el suelo y la plantación.

La evapotranspiración (ET) se define como el cambio de estado físico del agua, a través de la superficie del suelo (Evaporación) y mediante transpiración del cultivo (Allen *et al.*, 2006; De Souza *et al.*, 2011). En las primeras etapas de la planta, la ET se debe primordialmente a evaporación desde el suelo, pero con su desarrollo predomina la transpiración. La ET constituye uno de los principales parámetros en la estimación del consumo de agua por las plantas (Camargo & Camargo 2000; De Souza *et al.*, 2011). La (ET_o) equivale a la tasa de ET correspondiente a un cultivo hipotético de pasto

con características específicas y sin restricción hídrica (Allen *et al.*, 2006), y expresa el poder evaporante de la atmósfera. La (ET_c) es referida a la ET en condiciones óptimas presentes en parcelas con excelente manejo y adecuado aporte de agua, entre los métodos para la determinación de la ET_c destacan el balance de agua en el suelo y los lisímetros.

Los lisímetros son dispositivos contenedores de un volumen de suelo (disturbado o no) aislado hidrológicamente del suelo circundante, en el cual se desarrolla el cultivo presentando las mismas condiciones del área de contorno, donde es posible medir los parámetros que intervienen en el balance de agua (Allen *et al.*, 2006; Carvalho *et al.*, 2007; Puppo & García, 2009; De Faria *et al.*, 2005).

El coeficiente de cultivo (K_c) se refiere a la razón obtenida entre la ET_c y la ET_o; se relaciona con el cultivo, su desarrollo y las condiciones climáticas predominantes. (Chaves, 2005; De Souza *et al.*, 2011). Medeiros *et al.* (2004) recomiendan que sea determinado preferencialmente para las condiciones locales a las cuales será utilizado. Dada la importancia de este parámetro en el adecuado manejo y planificación del riego, es indispensable la investigación direccionada a determinar este valor en los cultivos potencialmente viables en proyectos de desarrollo nacional.

La Cúrcuma se encuentra entre los cultivos con potencial de comercialización a nivel nacional e internacional a los cuales aún no se les ha determinado el K_c. Es originaria de Asia, cultivada mayormente en la India con una producción anual de 635.950 ton en 175.190 ha. Recientes investigaciones le atribuyen beneficios antioxidantes, hepatoprotectores, antiinflamatorios, anticancerígenos, cardiovasculares y gastrointestinales (Ravindran *et al.*, 2007). En Colombia, aproximadamente el 80% se utiliza en la elaboración de harina y el otro 20% en la obtención de subproductos como el curry, píldoras, además de usos cosméticos, terapéuticos, culinarios y en la industria textil (Montaño & Montes, 2004; Soto *et al.*, 2004).

El objetivo de este trabajo es estimar el coeficiente de cultivo (K_c) de la cúrcuma (*Cúrcuma Longa*) en sus estados fenológicos, en las condiciones edafoclimáticas del municipio de Dagua, Valle del Cauca.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Determinar experimentalmente la curva del coeficiente de cultivo (K_c) mediante lisimetría para el cultivo de Cúrcuma (*Cúrcuma Longa L.*) en la vereda “Monteredondo”, corregimiento “El Limonar” del municipio de Dagua, Valle del Cauca.

3.2 Objetivos específicos

- Diseñar, construir e instalar 3 lisímetros de drenaje que se adapten a las características del suelo y del cultivo de la Cúrcuma para determinar la evapotranspiración del cultivo (ET_c).
- Determinar el coeficiente de cultivo (K_c) en cada una de las fases vegetativas y construir la curva experimental del coeficiente de cultivo.
- Determinar las necesidades hídricas del cultivo de cúrcuma con el fin de establecer las necesidades de riego netas para la planta.

4 MARCO TEÓRICO

4.1 Generalidades del Cultivo

4.1.1 Origen

La cúrcuma (también conocida como turmeric o azafrán de la india) es originaria del sudeste de Asia, donde muchas especies similares a la cúrcuma se dan en la naturaleza. La primera referencia sobre la cúrcuma data de 6000 años atrás en el *Atharvaveda* (libro sagrado del hinduismo), en el que era utilizada para curar la ictericia, este rizoma posee miles de años de historia documentada de su uso como medicina y en muchas prácticas socio-religiosas. La cúrcuma se cultiva más extensamente en la India, seguido de Bangladesh, China, Tailandia, Camboya, Malasia, Indonesia y Filipinas. A pequeña escala, también se cultiva en la mayoría de las regiones tropicales de África, América y las Islas del Océano Pacífico. El nombre de la cúrcuma tiene su origen en el latín medieval "*terramerita*", que se convirtió a *merite terre* del francés, que significa tierra merecida o tierra meritoria, un nombre con el que la cúrcuma en polvo era conocida en el comercio (Mesa *et al.*, 2000; Ravindran *et al.*, 2007).

En el pasado, la cúrcuma se utilizó para teñir ropa (algodón, seda y lana), aunque el color se degrada rápidamente en presencia de luz solar. En los tiempos modernos, la materia colorante de la cúrcuma (Curcumina) es utilizada como colorante alimentario en el queso, especias, mostaza, productos de cereales, encurtidos, copos de patata, sopas, helados, yogur, etc. Los estudios han indicado que la curcumina no es tóxica para los seres humanos, incluso a una dosis de 8.000 mg/día tomado de forma continua (Cheng, 2001 citado por Ravindran *et al.*, 2007). Los usos medicinales de la cúrcuma y la curcumina son realmente diversos y van desde crema facial cosmética hasta la prevención del Alzheimer. Recientes investigaciones sobre la cúrcuma se centran en su acción antioxidante, hepatoprotectora, antiinflamatoria, anticancerígena, y propiedades antimicrobianas, además de su uso en los trastornos cardiovasculares y gastrointestinales (Ravindran *et al.*, 2007; Soto *et al.*, 2004).

4.1.2 Descripción

La Cúrcuma (*Cúrcuma Longa*) es una especie herbácea, rizomatosa, con hojas perennes que pertenece a la familia *Zingiberaceae*. Posee unos rizomas subterráneos empleados como condimento,

tinte y estimulante medicinal. Como colorante es rojo anaranjado o pardo rojizo, de color picante y fresco, y sabor picante con un punto de almizcle.

En su fase de desarrollo pleno puede alcanzar un metro de altura y posee flores de color blanco amarillento (Ver Figura 1) dispuestas en espigas cilíndricas, cóncavas, de color verde, de las cuales nacen las flores. Presenta de 5 a 10 hojas grandes, anchas, con el peciolo muy largo, oval o lanceolado de color verde claro.



Figura 1. Flor de la cúrcuma

Sus rizomas pueden tener un grosor de 5 a 10 cm de diámetro, son pardas y muy arrugadas y en su interior presentan un color amarillo anaranjado intenso. El rizoma principal es carnoso, aovado, piriforme y de él salen otros rizomas secundarios, alargados, algo cilíndricos y más pequeños (Ver Figura 2). Éstos contienen un aceite esencial, pigmentos, un principio amargo, ácidos orgánicos, resina y almidón (CEI, 2012; Díaz & Ávila, 2002).



Figura 2. Rizomas de la cúrcuma. (Fuente: <http://www.infojardin.com>)

Soto *et al.* (2004) y Ravindran *et al.* (2007) afirman que la cúrcuma posee las siguientes etapas de desarrollo en su ciclo fenológico:

Etapa I. Germinación: Primeras 4 semanas después de la siembra.

Etapa II. Desarrollo vegetativo: Involucra los 4 primeros meses (posteriores a la germinación); cada planta produce hasta 3 tallos, se caracteriza por el inicio de los dedos y la maximización del crecimiento de los brotes.

Etapa III. Floración: Inicia con la floración (150 días), disminuye el crecimiento de la planta, se acelera el desarrollo de los rizomas y aumenta la acumulación de la curcumina.

Etapa IV. Maduración y cosecha: Entre los 6 y 7 meses se observa un amarillamiento de las hojas y el pecíolo, que son los signos utilizados para determinar el momento de la cosecha.

4.1.3 Cultivo

El cultivo se multiplica de forma asexual por medio de rizomas, de 2,5 cm x 5 cm (con mínimo 2 yemas para brotación); la reproducción es realizada a partir de yemas que surgen en el propio rizoma de la planta en el último año de crecimiento y que dan lugar a una planta renovada. El proceso de selección de los rizomas como material de propagación debe ser riguroso, seleccionando aquellos que cumplen con los estándares de calidad y sanidad. La plantación de los rizomas es conveniente realizarla a 0,1 m de profundidad (bien cubiertos); desde la finalización del invierno hasta el principio de la época de primavera, así, la floración se realizará durante el verano (CCI, 2006; Díaz & Ávila, 2002; Montaña & Montes, 2004).

Debido a la poca investigación en relación a las características agronómicas óptimas para el desarrollo de la cúrcuma longa, se encuentran registradas en la literatura diferentes distanciamientos de siembra y densidades de plantación. Acorde al Plan Hortícola Nacional (CCI, 2006) se maneja una distancia de plantación de 0,4 m entre plantas y 1 m entre surcos o líneas, para obtener una densidad de plantación de 25.000 plantas/ha. Montañó & Montes (2004) reportan distanciamientos de siembra de 0,5 metros entre líneas y 0,3 m entre plantas, con una densidad de 66.667 plantas/ha. Soto *et al* (2004) recomiendan distanciamientos de siembra entre plantas de 0,3 m y entre líneas de 0,7 m para una densidad de 47619 plantas/ha. Entre las fisiopatías y plagas que atacan este cultivo el Plan Hortícola Nacional menciona la hormiga arriera, nematodos, barrenadores de tallo, podredumbre roja (*Fusarium zingiberi*) y mancha foliar (*Colletotrichum zingiberis*).

4.1.4 Requerimientos edafoclimáticos

La Cúrcuma requiere en general un clima tropical o cálido húmedo a un rango de temperatura óptima entre 22°C y 28°C, siendo la temperatura mínima 18°C y la máxima 30°C; la humedad relativa es alta y debe estar alrededor de 70 a 90%; precipitación media anual de 640 a 4200 mm; los suelos deben ser sueltos, con muy buen drenaje y en lo posible franco-arenosos (arcillas pesadas inhiben el desarrollo del rizoma y los suelos arenosos no son adecuados para la formación de rizomas grandes) con pH entre 4,3 y 7,5 y adecuado sistema de riego. Este cultivo es sensible a suelos salinos así como al agua de riego salina y perdura a una altitud de 0 a 1200 m.s.n.m (CCI, 2006; Ravindran *et al.*, 2007).

4.1.5 Labores culturales

En el cultivo de cúrcuma se debe realizar la labor de desyerba con el propósito de mantener limpio el cultivo, actividad que ayuda a la prevención de enfermedades en la plantación.

De acuerdo al análisis de suelos, se debe incorporar materia orgánica con el fin de lograr un mejoramiento en la estructura y en la fertilidad. El riego es crítico al inicio del establecimiento de la plantación, puesto que la planta es exigente en este aspecto. Respecto al manejo fitosanitario es altamente recomendable establecer sistemas de monitoreo, lectura y trapeo de las principales plagas, enfermedades, malezas y fisiopatías que atacan al cultivo, con el fin de mantener en óptimas condiciones el cultivo y prevenir la aplicación de productos químicos a la plantación (CCI, 2006; Díaz & Ávila, 2002).

4.1.6 Fertilización

Durante la fase de crecimiento vegetativo activo es donde la máxima absorción de nutrientes se lleva a cabo. Se ha observado que la absorción de nutrientes es mayormente de potasio hasta el tercer mes, de nitrógeno hasta el cuarto mes, y de fósforo hasta el quinto mes con disminución posterior. El cultivo alcanza el máximo crecimiento vegetativo durante el cuarto y quinto mes, lo que sugiere la necesidad anterior de N, P, y K para aumentar el crecimiento de las plantas (Ravindran *et al.*, 2007). Se ha informado de que la cúrcuma consume 16,5 kg de N, 3,1 kg de P₂O₅ y 44,5 kg de K₂O por tonelada de producto (Instituto de Potasio y Fosfato de Canadá e India - PPIC, 2001).

Soto *et al.* (2004) en su estudio demostraron que aplicar fertilizante al momento de la siembra ayuda a obtener mayores rendimientos por planta, por parcela y por hectárea; también afirma que realizar una aplicación extra a base potasio a los 120 días se traduce en un aumento en el peso del producto cosechado por planta.

4.1.7 Riego

Los rendimientos más altos de la cúrcuma se obtienen en suelos francos bien drenados bajo irrigación. El número real de los riegos necesarios para producir una buena cosecha depende del tipo de suelo y las condiciones climáticas prevalecientes durante el crecimiento del cultivo y la precipitación. En Maharashtra, India el primer riego se aplica en el momento de la siembra, seguido de un segundo riego de 2 a 3 días más tarde, y riegos posteriores cada 8 a 10 días, dependiendo de la llegada de las lluvias, la humedad del suelo y la temperatura, hasta el último mes de crecimiento del cultivo cuando el riego es suspendido (Prabhakaran, 2013; Ravindran *et al.*, 2007). Por lo tanto, de 17 a 20 riegos se dan en una temporada, dependiendo de la lluvia recibida.

Se requiere un total de 1500 a 1650 mm de agua (riego y precipitaciones) para producir una buena cosecha de la cúrcuma (Ravindran *et al.*, 2007). Según Prabhakaran (2013) la mayor parte del agua se requiere durante la primera parte del crecimiento de la cosecha, cuando los rizomas se están desarrollando vigorosamente.

4.1.8 Cosecha y recolección

El cultivo está generalmente listo alrededor de 6 a 9 meses de crecimiento (dependiendo de la variedad). En la madurez se evidencia amarillamiento de las hojas y del peciolo de la planta (Ravindran *et al.*, 2007).

Para la recolección se extraen las raíces teniendo especial cuidado en no ocasionarle lesiones a la planta, posteriormente se hierven con el fin de desprender la cáscara exterior para exponer las yemas al sol de 5 a 7 días para el proceso de secado. Finalmente el producto obtenido se somete a una clasificación acorde a la calidad obtenida y suele ser molido, debido a que el modo más habitual de comercialización de este producto es en forma de polvo, aunque en muchos países se distribuye como extracto y cápsula (CEI, 2012; Díaz & Ávila, 2002).

4.2 El cultivo de la Cúrcuma en Colombia

4.2.1 Producción por departamentos

Montaño & Montes (2004) afirman que en Colombia existen alrededor de 20 productores de cúrcuma, en extensiones pequeñas. De acuerdo a la información recopilada y suministrada por pequeños productores existen aproximadamente 40.5 hectáreas sembradas en el país; en la Tabla 1 se registra la participación por departamento en la producción nacional, siendo Quindío quien lidera la producción con un 49,38% de participación seguido del Huila y del Tolima con 4,94% de participación cada uno; en relación a los rendimientos obtenidos se registran valores aproximados a 0,5 Kg/planta, equivalente a un margen de 35 – 40 ton/ha obteniendo una producción total aproximada a 1600 ton.

Tabla 1. Participación nacional en la producción de cúrcuma

DEPARTAMENTO	ÁREA (ha)	% Participación Nacional
Quindío	20	49,38
Huila	2	4,94
Tolima	2	4,94
Bolívar	1	2,47
Guaviare	2	4,94
Valle del Cauca	10	24,69
Arauca	1	2,47
Risaralda	0,5	1,23

Caldas	2	4,94
Total	40,5	100

Fuente: Montaña & Montes, 2004.

4.2.2 Exportaciones

Según el DANE (2013) las exportaciones en miles de dólares entre Jengibre, azafrán, cúrcuma, tomillo, hojas de laurel, «curry» y demás especias vienen en aumento desde el año 2009 hasta el año 2012, con una ligera disminución para el año 2013, así como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Exportaciones para Colombia en miles de dólares de diferentes especias

Año	Exportaciones en miles de dólares
2009	906
2010	1.648
2011	1.467
2012	1.750
2013	1.346

Fuente: DANE, 2013.

4.3 Evapotranspiración (ET)

4.3.1 Evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) se define como un proceso conjunto, dinámico y simultáneo de dos procesos por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo (Ver Figura 3); este proceso constituye un parámetro principal a la hora de realizar la estimación del consumo de agua en una plantación (Allen *et al.*, 2006; De Souza, 2011).

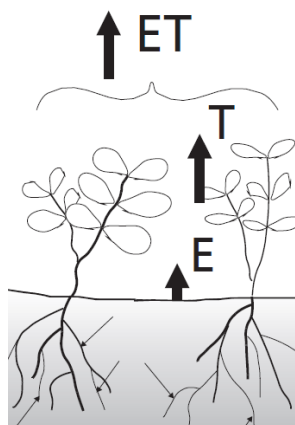


Figura 3. Efecto combinado de la evaporación y transpiración en un cultivo. Fuente: Allen *et al.* (2006)

La evaporación es el proceso por medio del cual el agua líquida se convierte en vapor (vaporización) y se retira de la superficie evaporante. Para evaluar dicho proceso es necesario considerar parámetros climáticos como temperatura del aire, radiación, velocidad del viento y humedad atmosférica; adicionalmente cuando la superficie evaporante es la superficie del suelo, se deben contemplar el grado de cobertura del suelo por parte del cultivo y la cantidad de agua disponibles en dicha superficie (Allen *et al.*, 2006).

La transpiración es fundamentalmente la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior eliminación hacia la atmósfera. Los cultivos pierden agua a través de aberturas en las hojas denominadas estomas, por medio de los cuales los gases y el vapor de agua atraviesan la planta para salir hacia la atmósfera. La transpiración está influenciada por los mismos parámetros climáticos evaluados en el proceso de la evaporación. Además se deben considerar el contenido de agua en el suelo, las características del cultivo y su estado fenológico, la salinidad del suelo y del agua de riego y finalmente el medio donde se produce y las prácticas del cultivo establecido (Allen *et al.*, 2006).

En las primeras etapas del cultivo, la pérdida de agua se debe primordialmente a evaporación directa del suelo, determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie; pero con el desarrollo del cultivo y a medida que este cubre el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal. La ET constituye uno de los principales parámetros en la estimación del consumo de agua por las plantas (Camargo & Camargo 2000; De Souza, 2011).

El concepto de evapotranspiración está compuesto fundamentalmente por tres definiciones: evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c), y evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_c aj). ET_o está relacionado con el clima que expresa el poder evaporante de la atmósfera. ET_c se refiere a la evapotranspiración en condiciones óptimas, con parcelas que presenten un excelente manejo y adecuado aporte de agua, logrando una excelente producción. Cuando no existe un manejo óptimo y se presentan limitantes ambientales que afectan el crecimiento del cultivo y restringen la evapotranspiración, ET_c requiere generalmente una corrección, pues ésta se presenta bajo condiciones no estándar de cultivo. La unidad de ET es normalmente milímetros (mm) por unidad de tiempo, la cual puede ser una hora, día, 10 días o mes (Allen *et al.*, 2006).

4.3.2 Evapotranspiración del cultivo de Referencia (ET_o)

La tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua, se conoce como evapotranspiración del cultivo de referencia o evapotranspiración de referencia y simbolizada como ET_o, representa la pérdida de agua en dicha superficie. La superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características específicas. Este cultivo cuenta con una altura asumida de 0,12 m, con una resistencia superficial fija de 70 s m⁻¹ y un albedo de 0,23. La superficie de referencia es muy similar a una superficie extensa de pasto verde, bien regada, de altura uniforme, creciendo activamente y dando sombra totalmente al suelo. La resistencia superficial hace relación a un suelo moderadamente seco que recibe riego con una frecuencia semanal (Allen *et al.*, 2006).

El concepto de una superficie de referencia fue introducido con el fin de obviar la necesidad de definir los parámetros únicos de evaporación para cada cultivo y etapa de crecimiento. La relación de la ET_o con un cultivo de referencia, incorpora procesos biológicos y físicos implicados en la ET de superficies cultivadas (Ver Figura 4) (Allen *et al.*, 2006).

Irmak & Haman (2003) afirman que mediante la adopción de un cultivo de referencia (pasto), se ha hecho más fácil y más práctico seleccionar coeficientes de cultivo consistentes y hacer confiable la estimación de la ET del cultivo en nuevas áreas. La introducción del concepto de evapotranspiración de referencia también ayudó a mejorar la transferibilidad de los coeficientes de cultivo (K_c) de un lugar

a otro. Además, con el uso de la evapotranspiración de referencia, es más fácil calibrar las ecuaciones de evapotranspiración para el clima de una región determinado. El pasto es un cultivo muy bien estudiado con respecto a sus características aerodinámicas y superficiales y es aceptado como superficie de referencia. Sin embargo este cultivo está seleccionado como cultivo hipotético, para evitar los problemas que conlleva los trabajos de calibración local que requerirían complejos y costosos estudios.



Figura 4. Esquema de la Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0). Fuente: Allen *et al.* (2006)

El enfoque de Penman-Monteith incluye todos los parámetros que gobiernan el intercambio de energía y el flujo de calor (evapotranspiración) de grandes extensiones uniformes de vegetación. La mayoría de los parámetros son medidos o pueden calcularse a partir de datos meteorológicos (Allen *et al.*, 2006).

4.3.3 Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c)

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar hace referencia a la evapotranspiración de un cultivo cuando se encuentra en excelentes condiciones, es decir exento de enfermedades, desarrollado en amplias parcelas o un campo extenso, bajo óptimas condiciones de humedad en el suelo y fertilización; características que le permiten alcanzar su máxima producción de acuerdo a ciertas condiciones climáticas (Ver Figura 5). Las diferencias en las propiedades de la vegetación, características de cobertura del suelo y resistencia aerodinámica, ocasionan que la evapotranspiración del cultivo difiera de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) bajos las mismas condiciones climáticas. Los efectos de las características que distinguen al cultivo de referencia (pasto) están asociadas al coeficiente del cultivo (K_c), indispensable para el cálculo de ET_c , pues la evapotranspiración del cultivo se calcula por medio del producto de ET_0 por K_c (Allen *et al.*, 2006)

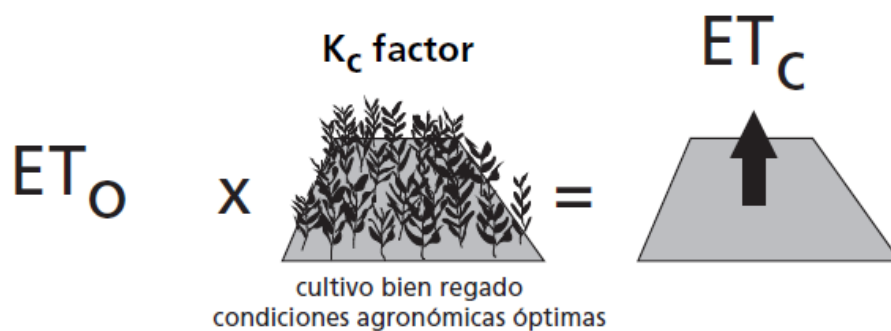


Figura 5. Esquemmatización de la ET_c bajo condiciones estándar. Fuente: Allen *et al.* (2006)

4.3.4 Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_c aj)

Cuando las condiciones en que se desarrolla un cultivo afectan negativamente su crecimiento y limitan la evapotranspiración, bien sea por un inadecuado suministro de agua o por un inadecuado manejo, el cultivo se encuentra fuera de las condiciones óptimas y, en esas circunstancias, se dice que se produce la ET_c aj (De Santa *et al.*, 2005).

Allen *et al.* (2006) afirman que la presencia de plagas, enfermedades, suelos salinos, baja fertilidad y restricciones o excesos de agua provocan una desviación entre la evapotranspiración real del cultivo y la ET_c bajo condiciones estándar, lo que resulta en una restricción del crecimiento de las plantas, disminución en la densidad de la plantación, lo que provoca una disminución en la tasa de evapotranspiración por debajo de los valores de ET_c .

La ET_c aj se calcula utilizando un coeficiente de estrés hídrico (K_s) o un K_c ajustado a todos los otros tipos de condiciones de estrés y limitaciones ambientales en la evapotranspiración del cultivo. Cuando las limitaciones son debido a la falta de suministro de agua en la zona de raíces para el óptimo desarrollo del cultivo el valor K_s es menor a 1, de lo contrario, $K_s=1$. El coeficiente K_s describe el efecto del estrés hídrico en la transpiración del cultivo y su cálculo requiere la realización de un balance hídrico que permita estimar el contenido de humedad en la zona radicular como lo describe la Figura 6 (Allen *et al.*, 2005; De Santa *et al.*, 2005).

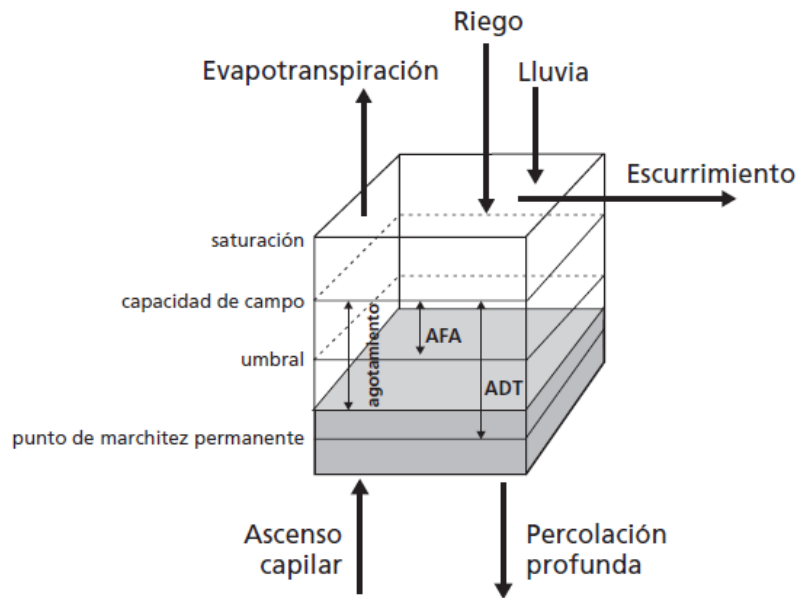


Figura 6. Balance de agua en la zona radicular. Fuente: Allen *et al.* (2006)

Según Allen *et al.* (2006) después de realizado el balance hídrico en la zona radicular se procede a la determinación del coeficiente de estrés hídrico usando la ecuación 1:

$$K_s = \frac{ADT - D_r}{ADT - AFA} = \frac{ADT - D_r}{(1 - p)ADT} \quad \text{Ecuación 1}$$

donde:

AFA= Agua fácilmente aprovechable de la zona radicular del suelo [mm]

ADT= Agua disponible total en la zona radicular del suelo [mm]

Dr= Agotamiento de humedad en la zona radicular [mm]

P= Fracción promedio del total de agua disponible en el suelo (ADT) que puede ser agotada de la zona radicular antes de presentarse estrés hídrico (reducción de la ET) [0 - 1], el valor P está en función del poder evapotranspirante de la atmósfera.

Luego de calcular el valor de Ks, se calcula la evapotranspiración ajustada ETc aj según se observa en la Figura 7, dependiendo de los coeficientes utilizados para describir la condición que no permite el óptimo desarrollo del cultivo.

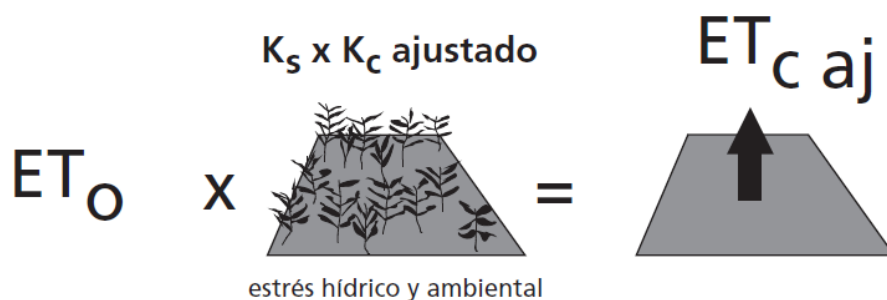


Figura 7. Esquematización de la ET_c bajo condiciones no estándar. Fuente: Allen *et al.* (2006)

4.4 Determinación de la evapotranspiración (ET)

Existe una diversidad de métodos a través de los cuales se puede estimar la evapotranspiración. La selección y aplicación de la técnica para determinar la magnitud del fenómeno dependerá directamente de la disponibilidad de información meteorológica y los recursos económicos (Jiménez, 1986).

Para la estimación de este parámetro existen técnicas de medición directa, entre las cuales destacan los lisímetros (Balance de agua en el suelo); y también de medición indirecta que son modelos matemáticos desarrollados a partir de variables agrometeorológicas.

4.4.1 Balance de Agua en el suelo

Este método consiste en realizar un balance de los flujos de agua en el suelo, considerando las entradas iguales a las salidas, evaluando los flujos entrantes y salientes de la zona radicular del cultivo en un periodo de tiempo (Ver Figura 8).

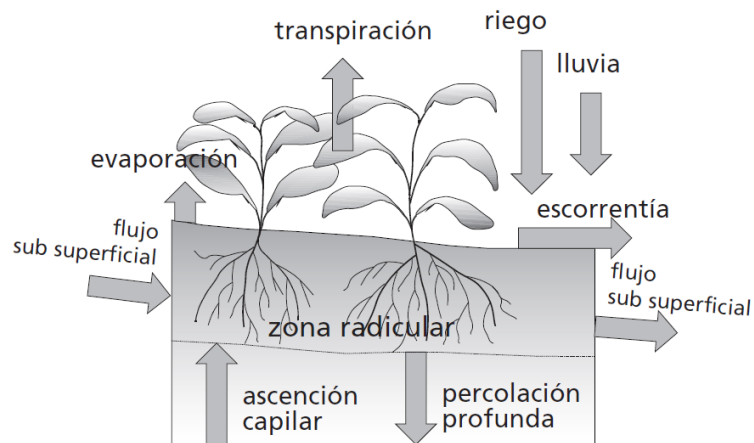


Figura 8. Balance de agua en el suelo. Fuente: Allen *et al.* (2006)

El riego (R) y la precipitación (P) aportan agua a la zona de raíces, sin embargo parte de estos pueden perderse por escurrimiento superficial (ES) y percolación profunda (D) (la cual recargará la capa freática). El agua puede ascender mediante capilaridad (C) desde la capa freática sub-superficial hacia la zona de raíces o transportarse horizontalmente por flujo sub-superficial hacia dentro (FSin) o fuera (FSout) de la zona radicular (ΔFS). La evaporación del suelo y la transpiración del cultivo pueden agotar el agua de la zona radicular. Teniendo todas las variables que intervienen en el balance determinadas, la ET puede ser deducida a partir del cambio en el contenido de humedad del suelo (ΔW) a lo largo de un periodo de tiempo (Allen *et al.*, 2006); el balance se expresa en la siguiente ecuación:

$$ET = R + P - ES - D + C \pm \Delta FS \pm \Delta W \text{ Ecuación 2}$$

Sin embargo, excepto bajo condiciones de pendientes pronunciadas, los valores de (FSin) y (FSout) son mínimos y pueden ser despreciados, simplificando la ecuación del balance hídrico:

$$ET = R + P - ES - D \pm \Delta W \text{ Ecuación 3}$$

4.4.2 Lisímetros

Aboukhaled *et al.* (1986) citado por De Santa *et al.* (2005) define los lisímetros como recipientes grandes llenos de suelo o encerrando una masa de suelo, ubicados en el campo para representar sus condiciones naturales, de superficie desnuda o con cubierta vegetal (cultivos o césped), utilizados para determinar la ET de un cultivo en crecimiento, o una cubierta vegetal de referencia, o para determinar la evaporación en suelos desnudos.

Jiménez (1986) menciona que son recipientes en los cuales se trata de mantener la uniformidad del ambiente, de tal forma que al sembrarse alguna especie vegetal para su evaluación, el comportamiento sea igual al de las condiciones naturales, mientras que Carvalho *et al.* (2007) dicen que son estructuras especiales en las cuales un volumen de suelo con vegetación está aislado, con el fin de que todas las entradas y salidas de agua del sistema sean controladas. Puppo & Garcia (2009) los definen como dispositivos que contienen un volumen de suelo, aislado hidrológicamente del suelo circundante, en el cual resulta posible controlar y medir los diferentes términos que intervienen en el balance de agua.

La ecuación del balance de hídrico representa las entradas y salidas de agua en un lisímetro para un periodo de medida (ecuación 4); al tratarse de un recipiente con paredes laterales la escurrimiento

superficial puede considerarse nula y la ET se obtiene mediante la siguiente ecuación (De Santa *et al.*, 2005):

$$ET = R + P - D \pm \Delta W \text{ Ecuación 4}$$

La precipitación (P) y el riego (R) son medidos mediante pluviómetros o métodos volumétricos, el agua que drena (D) se mide mediante un dren y un recipiente de volumen conocido; el cambio en el contenido de humedad del suelo (ΔW) es la variable más difícil de estimar y depende del tipo de lisímetro la exactitud de su determinación (De Santa *et al.*, 2005).

La clasificación de los lisímetros se basa en su forma de determinar el contenido de humedad en el suelo, y se dividen en 2 categorías: Los lisímetros no pesantes o de drenaje y los lisímetros de pesada.

En los lisímetros de pesada los cambios de peso provocados por la ET, precipitación o riego se detectan mediante distintos tipos de balanzas mecánicas. El principio de contrapeso en las balanzas mecánicas se ha aplicado en el diseño de lisímetros de alta precisión, los cuales permiten tener estimaciones de ET a intervalos de horas o incluso menos, la sensibilidad de éstos puede llegar a ser de 0,03 mm de agua (Aboukhaled *et al.*, 1986 citado por De Santa *et al.*, 2005).

En los lisímetros de drenaje, el agua en exceso es recogida en el fondo del lisímetro y medida volumétricamente (Allen *et al.*, 2006; De Santa *et al.*, 2005)

Mediante riego el cálculo de ET con lisímetros de drenaje es más simple, debido a que se debe mantener el suelo en condiciones de humedad óptima, lo que simplifica la ecuación del balance hídrico resultando en (Chavarri, 2004):

$$ET = R + P - D \text{ Ecuación 5}$$

4.4.3 Determinación de ETo a partir de datos climatológicos (Método FAO Penman-Monteith)

En 1990 un grupo de expertos organizados por la FAO en conjunto con la Comisión Internacional de Riego y Drenaje (ICID) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM), recomendaron el método de combinación Penman-Monteith como el único y más apropiado para la estimación de la evapotranspiración de referencia ETo (FAO, 1990 citado por De Santa *et al.*, 2005).

La ecuación que permite el cálculo de ETo recibe el nombre de FAO Penman-Monteith, o también FAO56 Penman-Monteith (De Santa *et al.*, 2005; Allen *et al.*, 2006). Esta ecuación resulta de aplicar en la ecuación general de Penman-Monteith los valores de las resistencias aerodinámica y superficial, lo que hace que el resultado presente globalmente valores más consistentes con datos reales de uso de agua de diversos cultivos (Allen *et al.*, 2006). Ésta se describe a continuación:

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

Ecuación 6

Donde:

ETo: Evapotranspiración de referencia [mm/día]

Rn: radiación neta en la superficie del cultivo [MJ/m² día]

G: flujo de calor de suelo [MJ/m² día]

T: temperatura media del aire a 2 metros de altura [°C]

U₂: velocidad del viento a 2 metros de altura [m/s]

e_s: presión de vapor de saturación [kPa]

e_a: presión real de vapor [kPa]

Δ: pendiente de la curva de presión de vapor [kPa/°C]

γ: constante psicrométrica [kPa/°C]

Para poder desarrollar los cálculos diarios, semanales, decadales o mensuales de ETo, además de la localización del sitio, la ecuación FAO Penman-Monteith requiere datos de temperatura del aire, humedad atmosférica, radiación y velocidad del viento; éstas siguen las pautas establecidas en el procedimiento FAO (Allen *et al.*, 1998 citado por De Santa *et al.*, 2005; Allen *et al.*, 2006).

- **Temperatura**

Para emplear la fórmula FAO Penman-Monteith, es necesario información de temperatura diaria (promedio) máxima y mínima en grados centígrados (°C). Cuando se cuente solamente con

temperaturas medias diarias, se esperaría una subestimación de ETo debido a la relación no-lineal de la presión de vapor de saturación en relación con la temperatura. El uso de la temperatura media del aire en lugar de la temperatura máxima y mínima tiene como resultado una presión de saturación más baja lo que implica una estimación más baja de la evapotranspiración de referencia.

- **Humedad**

El valor de la presión real (promedio) diaria de vapor, (e_a), en kilopascales (kPa) se requiere como dato de entrada para la aplicación de la ecuación FAO Penman-Monteith. En caso de que los valores de presión real de vapor no estén disponibles, estos pueden ser derivados de la humedad relativa máxima y mínima (%), de los datos psicrométricos (temperaturas de bulbo seco y mojado en °C) o de la temperatura del punto de rocío (°C).

- **Radiación**

La radiación neta diaria (promedio) está expresada en megajoules por metro cuadrado por día (MJ/m² día). Estos datos no están disponibles comúnmente en forma directa pero pueden derivarse de la radiación de onda corta (promedio) o de la duración real diaria (promedio) del sol brillante (horas por día) medida con el heliógrafo.

- **Viento**

Para emplear la ecuación FAO Penman-Monteith es necesario contar con la velocidad del viento (promedio) diaria en metros por segundo (m/s) medida a 2 m de altura sobre el nivel del suelo. En caso de contar con datos de velocidad de viento a otra altura, se deberá hacer la corrección a la altura estándar de 2 m.

Muchos programas informáticos utilizan ya la ecuación FAO Penman-Monteith para la determinación de la evapotranspiración de referencia, entre ellos se encuentra el software CropWat, el cual fue desarrollado por la FAO para el cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos y las necesidades de riego en base a datos del suelo, el clima y las cosechas (Allen *et al.*, 2006).

4.4.4 Curva de retención de Humedad del Suelo

Para un mismo contenido de humedad, los distintos suelos retienen el agua con una energía diferente, es decir, la relación humedad-potencial mátrico es distinta para cada tipo de suelo. La representación gráfica de esta relación en un amplio rango de tensiones se conoce como la curva de retención de

humedad (Figura 9). La textura es muy influyente en la capacidad de retención de agua en los suelos; en los suelos arcillosos, la variación del potencial mátrico es paulatina, mientras que en los arenosos, cuando la humedad baja de un cierto valor, se produce un cambio brusco que corresponde al paso de macroporos a microporos. La curva de retención permite conocer el contenido de humedad de un suelo en cualquier momento, por lo cual, sirve como herramienta para la planificación del riego y para control en campo mediante el uso de tensiómetros (Jaramillo, 2002).

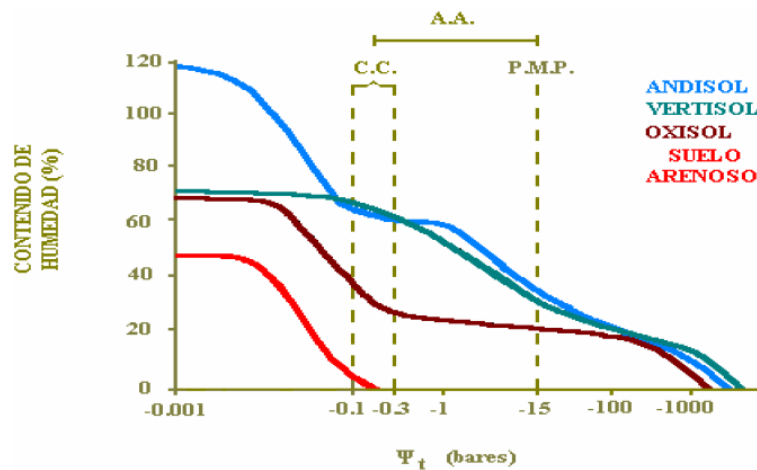


Figura 9. Curva de retención de humedad del suelo. Fuente: Jaramillo (2002)

A continuación se describen 2 métodos para determinar la curva de retención de humedad del suelo:

- Determinación en Laboratorio

Para establecer la curva, en el laboratorio, las muestras de suelos se someten a diferentes presiones (0.1, 0.3, 1, 5, 10 y 15 atm, por ejemplo) y cuando se llega al equilibrio, se determina el contenido de humedad que presenta la muestra por el método gravimétrico, posteriormente se transforma a contenido volumétrico. Las tensiones se aplican a las muestras en platos de presión y los resultados se grafican en papel semilogarítmico, colocando, en la escala logarítmica, la tensión y, en la aritmética, el % de humedad. Teniendo definida la curva de retención de humedad de un suelo, puede establecerse el contenido de humedad que presenta éste en cualquier momento, al medir en el campo la tensión con que esa agua está retenida (Jaramillo, 2002).

- Determinación mediante modelos matemáticos

Generalmente el número de puntos medidos para generar la curva de retención de humedad resulta una cantidad reducida debido al trabajo de campo y laboratorio, así como los costos requeridos.

Turgut & Sabit (2008) aseguran que el uso de modelos analíticos en los estudios de agua en el suelo incluye una fácil comparación de propiedades hidráulicas de los suelos, interpolación de datos faltantes e información adecuada para la aplicación de los modelos de flujo en la zona no saturada. Según Van Genuchten (1980) los modelos empíricos de retención de humedad del suelo, pueden dividirse en cuatro categorías según su relación funcional: exponencial, potencial, coseno hiperbólico y función error. Muchos autores utilizan una función potencial para caracterizar la retención de humedad del suelo. El modelo de Van Genuchten con la restricción $m=1-1/n$ tiene la siguiente ecuación:

$$Se = \frac{1}{[(1+(\alpha h)^n)^m]} \quad \text{Ecuación 7}$$

Siendo:

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad \text{Ecuación 8}$$

donde:

Se: Saturación efectiva

θ_r : Humedad residual

θ_s : Humedad de saturación

θ : Contenido de humedad

h: tensión [cm]

n: Parámetro de ajuste de la curva

El modelo de Van Genuchten (1980) ha sido utilizado con éxito por varios investigadores; Ruiz *et al.* (2006) compararon los modelos de Gardner, Brooks y Corey y Van Genuchten para 173 curvas de retención de humedad de diferentes agrupamientos de suelos, siendo en todos los casos el modelo de Van Genuchten el que obtuvo menor suma de cuadrados residuales media; también Ruiz (1997) ajustó 26 curvas de retención de humedad correspondientes a un suelo Ferralítico Rojo (Ferralsol) a los modelos de Gardner y Van Genuchten obteniéndose una suma de cuadrado residual menor en 2.5 veces para el modelo de Van Genuchten; López-Canteñis *et al.* (2010) recopilaron 570 muestras de

diferentes suelos y regiones de Cuba, y en su estudio resultó que el modelo de Van Genuchten con la condición de $m = 1-1/n$ fué el que mejor se adaptó a las condiciones evaluadas, con suma de cuadrados residuales entre 0.05×10^{-3} y 2.86×10^{-3} g g⁻¹ y r^2 mayor que 0.92.

4.4.5 Medición del contenido de humedad del suelo in situ

A continuación se presentan dos métodos que permiten determinar el contenido de humedad del suelo:

- Tensiómetros

Según Pizarro (1996) existen dos tipos de tensiómetros, los de manómetro y los de mercurio. Un tensiómetro de manómetro consiste en un tubo en cuyo extremo inferior se coloca una cápsula cerámica porosa, y en la parte superior cerrado herméticamente, un manómetro de vacío (Figura 10). Para su instalación el tensiómetro se llena de agua y se introduce en el terreno, colocando la cápsula porosa a la profundidad deseada. El que la cápsula sea porosa permite que el agua salga de ella o entre, lo que hace que al cabo de un cierto tiempo se establezca el equilibrio entre el agua del interior de la cápsula y el agua del suelo. A medida que el suelo pierde humedad la succión aumenta, es decir, el suelo ejerce más fuerza para retener el agua. Si la humedad del suelo aumenta, pasa agua del suelo a la capsula, disminuyendo el valor absoluto de la presión del manómetro (Pizarro, 1996). Por tanto, los tensiómetros dan una idea del esfuerzo que deben realizar las raíces de la planta para extraer la humedad del suelo.



Figura 10. Tensiómetro de manómetro

- TDR (Time domain Reflectometry)

La técnica de Reflectometría de Dominio Temporal (TDR, Time Domain Reflectometry) es en estos momentos un método mundialmente aceptado para la medida de la humedad en suelos. Tal como lo describen Moret *et al.* (2007) dicha técnica se basa en la medida de la velocidad de transmisión de una onda electromagnética (EM) a lo largo de una sonda inmersa en el suelo cuya constante dieléctrica K está directamente relacionada con la humedad (Figura 11). Las medidas del perfil de humedad por TDR pueden realizarse utilizando: (i) sondas verticales de diferente longitud; (ii) sondas horizontales enterradas en el suelo a diferentes profundidades; y (iii) sondas TDR simples insertadas verticalmente en el suelo. De entre estas tres modalidades, los sistemas de sondas verticales presentan mayores ventajas con respecto al sistema de sondas horizontales ya que permiten la realización de medidas con una alteración mínima del suelo. Es un sistema preciso y de fácil manejo cuyo principal problema es su alto costo.



Figura 11. Sonda TDR. Fuente: www.sbk-mexico.com

4.5 Coeficiente de cultivo (K_c)

El coeficiente de cultivo (K_c) es un parámetro que resume el comportamiento de los cultivos en el sistema suelo-atmósfera, e integra factores tales como las características fisiológicas de la planta, etapas del desarrollo fenológico y las condiciones climáticas predominantes (Chaves *et al.*, 2005; Medeiros *et al.*, 2004; Doorenbos y Pruitt, 1976 citado por Rodríguez, 2012).

En el Kc se combinan los efectos de la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo. Éste, integra las diferencias en la evaporación en el suelo y en la tasa de transpiración del cultivo, entre el cultivo y la superficie de referencia. Debido a que la evaporación en el suelo puede fluctuar diariamente como resultado de la lluvia o el riego, el Kc es solamente una expresión de los efectos promedios en el tiempo (múltiples días), de la evapotranspiración del cultivo; que permite, diseñar, planificar y realizar un manejo adecuado del riego (Allen *et al.*, 2006).

El Kc se obtiene de forma experimental, mediante la relación entre la (ETc) y la (ETo) y se describe en la siguiente ecuación:

$$Kc = \frac{ETc}{ETo} \quad \text{Ecuación 9}$$

4.5.1 Factores que determinan el coeficiente de cultivo

El Kc está condicionado a ciertos factores que afectan tanto a la evaporación del suelo como a la evapotranspiración del cultivo. Estos factores son:

- **Tipo de cultivo**

Debido a las diferencias en ciertas propiedades y características del cultivo, como la altura de éste, que modifica la resistencia aerodinámica; el albedo, que produce cambios en la radiación absorbida; así como características de los estomas y hojas de la planta; se originan diferencias entre la evapotranspiración de un cultivo bien desarrollado y regado y la de referencia (De Santa *et al.*, 2005; Allen *et al.*, 2006).

Los espaciamientos estrechos entre plantas, así como una mayor altura y rugosidad de la superficie de la gran mayoría de cultivos agrícolas, producen como consecuencia que estos cultivos exhiban valores de coeficiente Kc mayores a 1,0. En cultivos como el maíz y la caña de azúcar el Kc es 15-20% superior al de referencia. Mientras que las especies que presentan estomas solamente en la parte inferior de la hoja y/o presentan gran resistencia en las hojas, tendrán valores menores de Kc. Este es el caso de los cítricos y algunos frutales (Allen *et al.*, 2006).

- **Clima**

Los cambios en la velocidad del viento modifican el valor de la resistencia aerodinámica de los cultivos y por lo tanto los valores de Kc, especialmente en cultivos que presenten una altura mayor a la del cultivo hipotético (pasto). Los valores de Kc en la mayoría de los cultivos aumentan cuando la

velocidad del viento aumenta y cuando la humedad relativa disminuye, en condiciones de mayor aridez climática y de una mayor velocidad del viento, los valores de K_c aumentan, especialmente cuando se tiene cultivos de mayor altura. Por otro lado, en climas húmedos y en condiciones de velocidades del viento bajas, las diferencias en la resistencia aerodinámica serán poco significativas y los valores de K_c disminuyen (De Santa *et al.*, 2005; Allen *et al.*, 2006).

- **Evaporación del suelo**

Las diferencias existentes en la evaporación del suelo y la transpiración del cultivo, entre el cultivo de campo y el cultivo de referencia, están incorporadas en el coeficiente del cultivo. El valor para K_c de cultivos que cubren completamente el suelo refleja las diferencias en transpiración debido a que la evaporación es casi despreciable. En cambio en cultivos con poca cobertura, el coeficiente K_c está determinado principalmente por la frecuencia con la que se humedece la superficie del suelo, cuando el suelo está humedecido la mayoría del tiempo, la evaporación será significativa y el valor del K_c será superior a la unidad, sin embargo, si el suelo está seco la evaporación se verá restringida incidiendo en un valor pequeño de K_c (Allen *et al.*, 2006).

4.5.2 Curva del Coeficiente de cultivo

Esta curva representa los cambios del K_c a lo largo de la temporada de desarrollo del cultivo (ciclo fenológico), la forma de la curva incorpora los cambios en la vegetación y el grado de cobertura vegetal del suelo a medida que la planta se desarrolla y madura; la curva toma los valores más altos cuando el cultivo alcanza su máximo índice de área transpirante como se observa en la Figura 12. A partir de la curva del coeficiente de cultivo se puede obtener el coeficiente K_c , y por ende la ET_c para cualquier periodo durante el crecimiento de la planta (Allen *et al.*, 2006). Para la construcción de la curva se necesitan tres valores del coeficiente K_c , correspondientes a la etapa inicial ($K_{c\text{ ini}}$), media ($K_{c\text{ med}}$) y final del cultivo ($K_{c\text{ fin}}$).

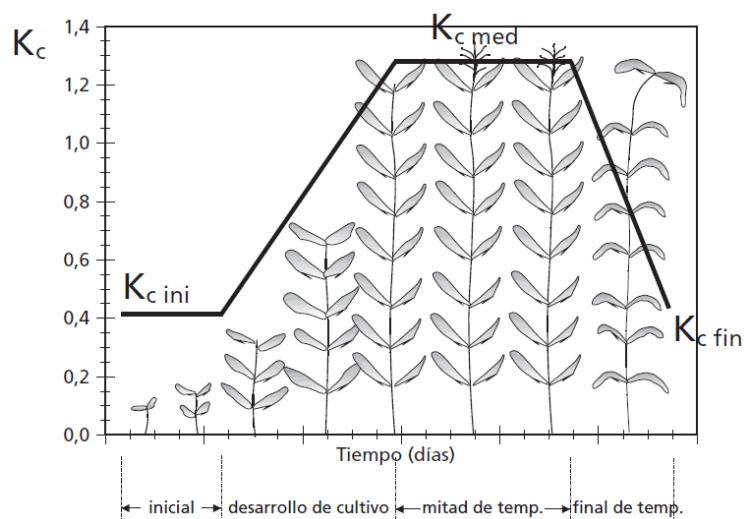


Figura 12. Curva del coeficiente de cultivo. Fuente: Allen *et al.* (2006)

5 METODOLOGÍA

5.1 Localización – Área de estudio

La investigación se realizó en una parcela de 0.8 hectáreas pertenecientes a la Escuela Agroecol, ubicada en la vereda Monterredondo, corregimiento del Limonar, zona rural del municipio de Dagua, Valle del Cauca, ubicado al occidente entre los municipios de Buenaventura, Restrepo, La Cumbre, Calima - Darién y Santiago de Cali a $3^{\circ}, 39', 37''$ de latitud norte y $76^{\circ}, 41', 34''$ de longitud oeste, con una temperatura media de 24°C y una altitud media de 1.233 msnm, una precipitación media anual de 1.159 mm y distante 46 Km de la ciudad de Santiago de Cali (Figura 13).

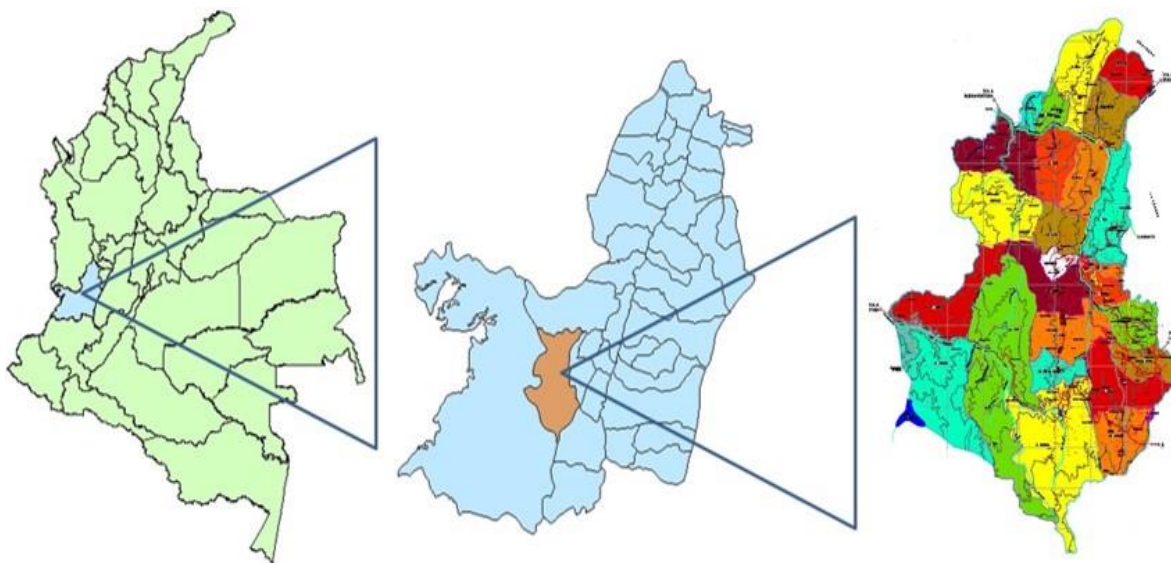


Figura 13. Mapa de Localización Dagua, Valle del Cauca. Fuente: www.dagua-valle.gov.co/

La parcela donde se desarrolló la investigación cuenta con un área de 0.8 hectáreas (Figura 14), ubicada a 3°35'39" N, 76° 39'52" W y una altitud de 1381 m.s.n.m. Sus propietarios pertenecen a la asociación AGROECOL del municipio de Dagua. El uso actual del predio en conjunto es destinado al cultivo de cúrcuma (*Cúrcuma Longa*).

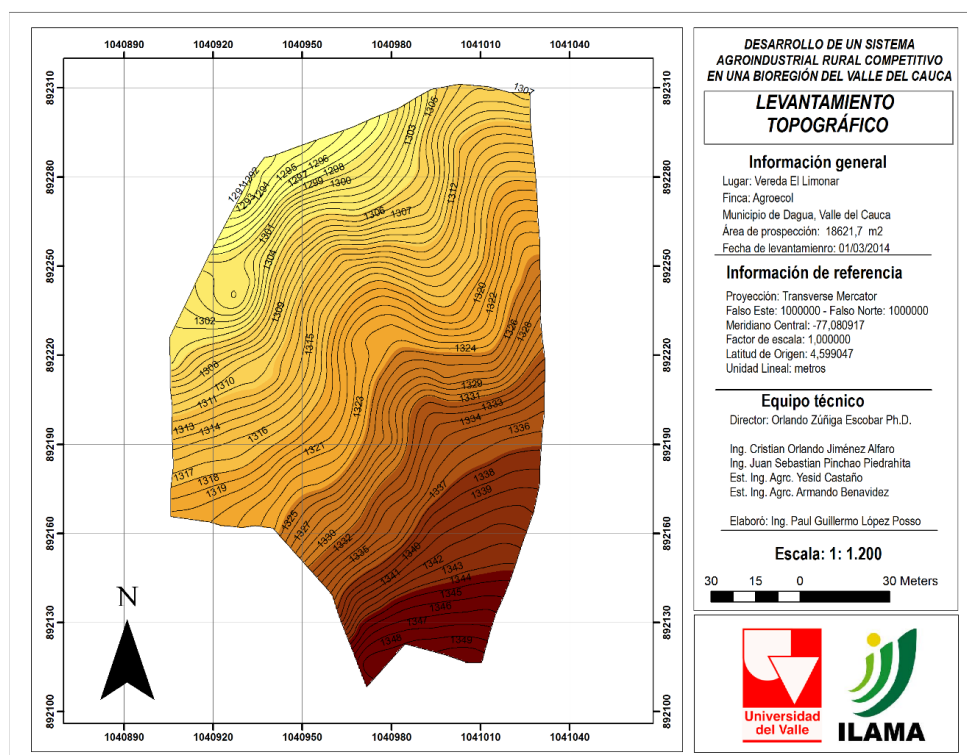


Figura 14. Levantamiento topográfico del área donde se realizó el estudio. Fuente: Grupo de investigación ILAMA - Univalle

5.2 Contextualización del proyecto

La presente investigación se encuentra enmarcada dentro del componente de producción del proyecto “Desarrollo de un sistema Agroindustrial competitivo a partir de cultivos promisorios en una Bioregión del Valle del Cauca”, financiado por el sistema general de regalías de Colombia.

Paralelo a la determinación de la curva del coeficiente de cultivo se estableció un sistema de riego por goteo que abasteciera 8 módulos de riego distribuidos en 0.8 ha de cúrcuma; la primera actividad de este proceso fue el estudio de oferta hídrica para conocer la cantidad de agua disponible y la calidad, éste último parámetro se determinó mediante la evaluación en laboratorio de 9 muestras tomadas en distintos puntos de la fuente hídrica. Posteriormente se realizó el diseño agronómico, hidráulico, de la red de conducción y distribución para finalmente instalar el sistema. Para el diseño se tuvo en cuenta un espaciamiento entre plantas y entre surcos de 0,4 m y 1 m respectivamente.

Todo el proceso de diseño e instalación del sistema de riego por goteo estuvo a cargo del grupo de investigación “REGAR” perteneciente a la escuela de Ingeniería de los Recursos Naturales y del Ambiente (EIDENAR) de la Universidad del Valle.

Una consideración importante en el desarrollo de la demanda hídrica del proyecto, es que se asumió un valor de $K_c=1$ para la cúrcuma, puesto que en la literatura no se encuentra registrado este valor para las condiciones agrometeorológicas del municipio de Dagua, Valle del Cauca.

5.3 Determinación de Evapotranspiración

5.3.1 Determinación de la evapotranspiración de cultivo (ET_c)

5.3.1.1 Diseño y construcción de lisímetros

Se construyeron 3 lisímetros de drenaje como el observado en la Figura 15 con las dimensiones establecidas en la Figura 16; las dimensiones fueron determinadas acorde a diferentes características fisiológicas del cultivo como: Profundidad radicular, distancia entre plantas, entre surcos y el área que le corresponde a una planta de cúrcuma en un cultivo, toda esta etapa se realizó en el Laboratorio de Aguas y Suelos Agrícolas LASA, el cual pertenece a la Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente EIDENAR, de la Universidad del Valle, ubicado en el municipio de Santiago de Cali, Valle Del Cauca.

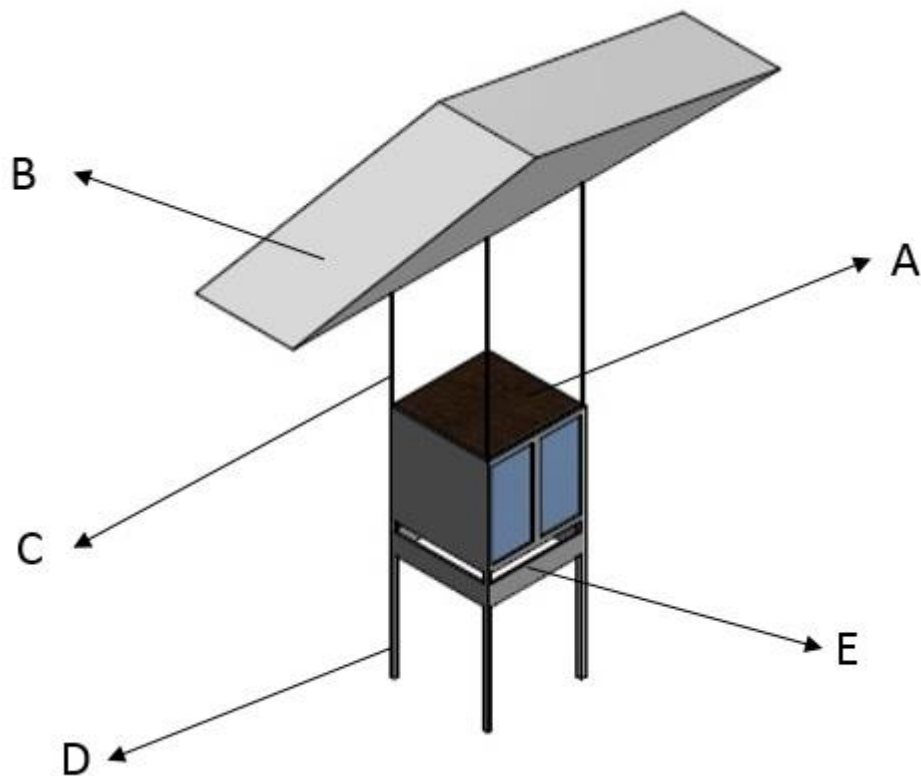


Figura 15. Esquema del Lisímetro y Componentes

Componentes del Lisímetro de Drenaje:

A: En este compartimiento se depositó el suelo donde se desarrolló la planta, además se instaló una batería de tensiómetros situados a diferentes profundidades que permitieron determinar indirectamente el contenido de humedad del suelo.

B: El techo simplifica la ecuación del balance hídrico puesto que evita que hallan recargas en el lisímetro por efecto de la precipitación, el material usado fue teja cristal para evitar el efecto del color en la radiación solar sobre las plantas.

C: Se usaron 4 varillas roscadas que soportaron el techo y permitían subirlo o bajarlo.

D: Soportes del lisímetro.

E: La bandeja tuvo como fin recoger el agua que drenara del lisímetro.

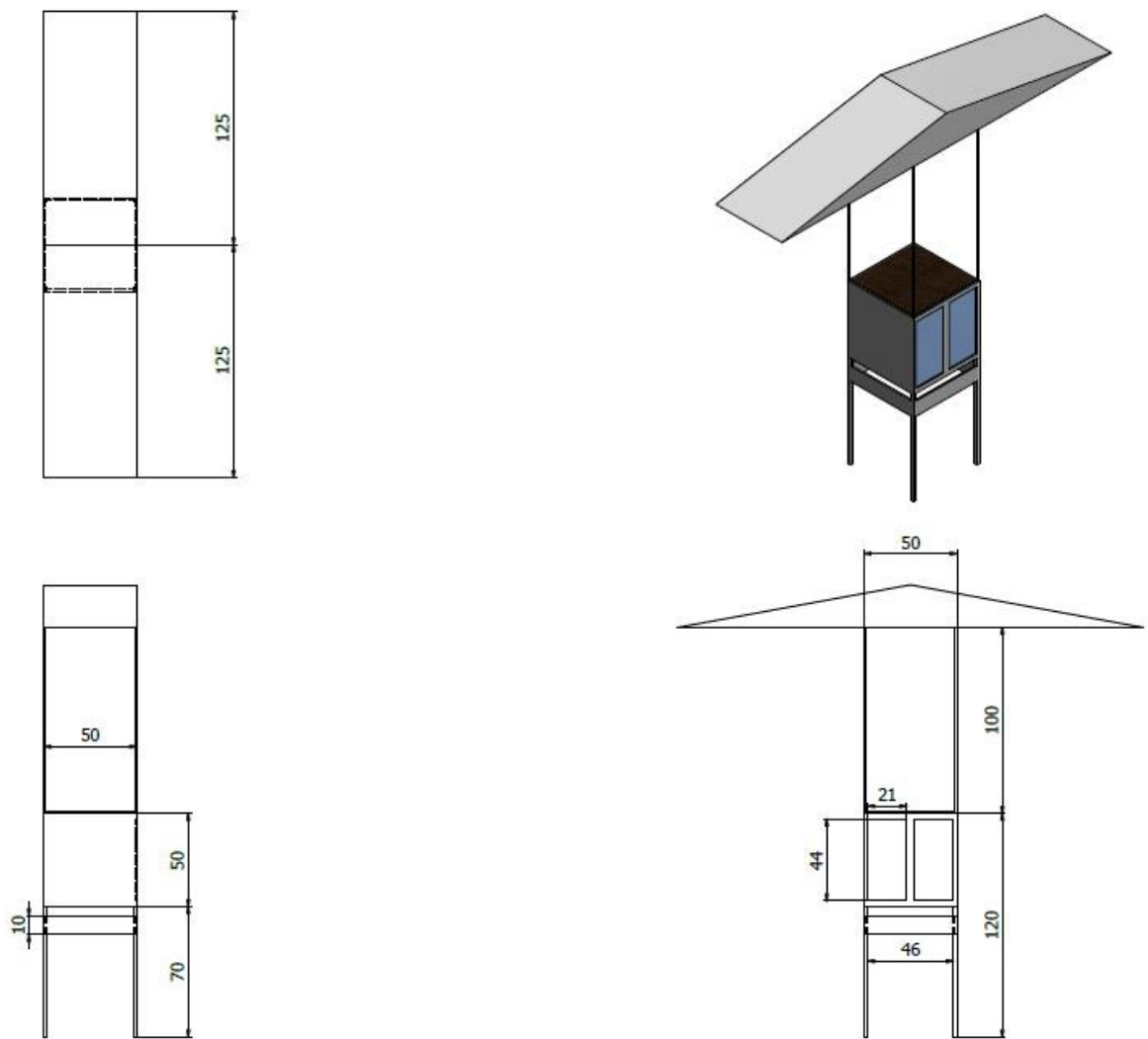


Figura 16. Vistas del Lisímetro y dimensiones en centímetros.

En caso de que ocurriera un exceso en el riego y siguiendo la metodología del balance hídrico, se realizaron una serie de orificios ubicados a 5 cm x 5 cm en la base del lisímetro, que permitían el paso del agua hacia la bandeja para su posterior medida (Figura 17)Figura 17. Para evitar la posible obturación de los orificios en la base de cada lisímetro se depositó una capa de grava de aproximadamente 8 cm en que hiciera un efecto de filtro.



Figura 17. Base del lisímetro

A continuación se observan los lisímetros previamente contruidos, ya instalados en el cultivo de cúrcuma, ubicado en la vereda “Monteredondo”, corregimiento “El Limonar”, lugar donde se realizó la investigación.



Figura 18. Lisímetros usados en la investigación.

5.3.1.2 Instalación de Lisímetros

Los 3 lisímetros se instalaron un tiempo antes del trasplante de las plantas de cúrcuma, para darle al suelo que en ellos se depositó, un tiempo de reordenarse. El llenado se realizó con suelo de la finca y

se trató de disturbarlo lo menos posible; para esto se hizo un llenado por horizontes, buscando la mayor semejanza al suelo del predio. Cada lisímetro se dispuso al azar en el predio como se observa en la Figura 19:

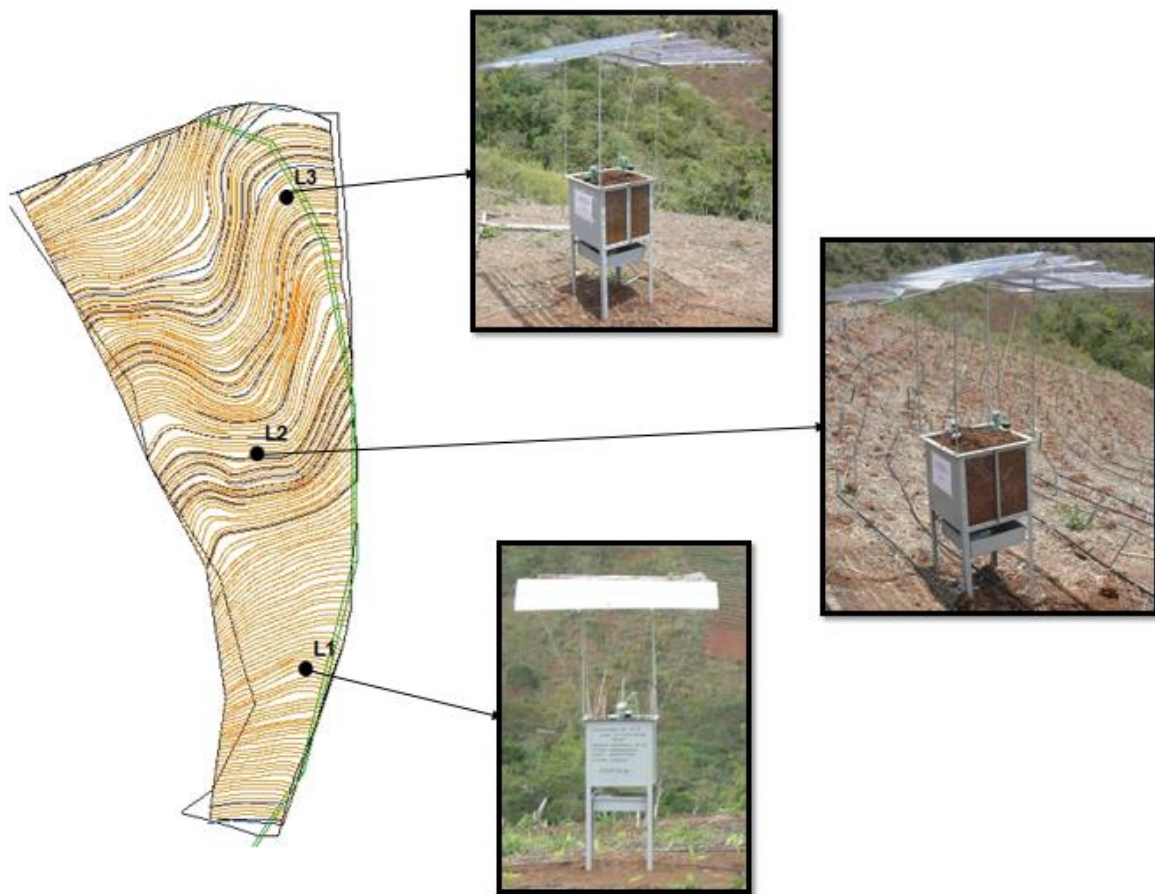


Figura 19. Ubicación de lisímetros en el predio.

En cada lisímetro se instalaron 2 tensiómetros ubicados a 15 y 30 cm de profundidad, como se observa en la Figura 20.



Figura 20. Tensiómetros instalados en el lisímetro

5.3.1.3 Determinación de la capacidad de campo del suelo en los lisímetros

Durante la investigación se tuvo una consideración que consistió en mantener a capacidad de campo el suelo en la zona radicular con el fin de tener condiciones óptimas de humedad para el desarrollo de las plantas. Para la determinación de la capacidad de campo en los lisímetros se siguió la metodología propuesta por Wagner *et al.* (1991) usando la mesa de tensión; para ello se tomaron dos muestras de suelo sin disturbar por cada lisímetro, una a 15 cm y otra a 30 cm de profundidad mediante un barreno y cilindros, así como se observa en la Figura 21.

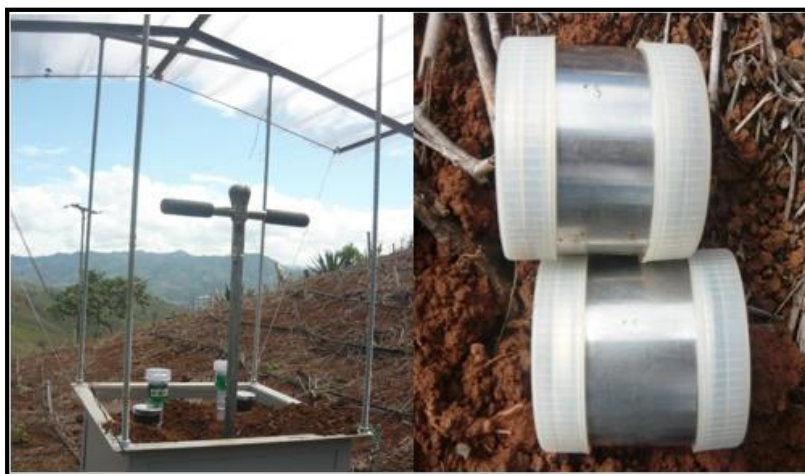


Figura 21. Toma de muestras de suelo en los lisímetros

Los 6 cilindros con las muestras de suelo fueron llevados al laboratorio LASA de la Universidad del Valle donde se dejaron saturar sobre la mesa de tensión durante 48 horas (Figura 22), posteriormente, se procedió a drenar las muestras en la mesa de tensión a una succión de 0,1 atmósferas durante 48 horas, hasta alcanzar el peso en equilibrio, el cual representa la humedad a capacidad de campo del suelo (PSD).



Figura 22. Muestras de suelo a saturación sobre la mesa de tensión

A continuación los 6 cilindros fueron llevados a la estufa a una temperatura de 105°C durante 24 horas, determinándose el peso de suelo seco (PSS) como se observa en la Figura 23.



Figura 23. Muestra de suelo pesada en la balanza

Para obtener el contenido de humedad a capacidad de campo (CC) en base masa y en forma porcentual se aplicó la siguiente ecuación:

$$CC = \frac{PSD - PSS}{PSS} * 100 \text{ Ecuación 10}$$

5.3.1.4 Determinación de la curva de retención de humedad del suelo

La determinación de la curva de retención se realizó mediante el modelo matemático descrito en el literal 4.4.4, usando el software RETC realizado por Van Genuchten *et al.* (2000), a partir del cual se generó 1 curva de retención de humedad para cada lisímetro; los parámetros de curva alpha y n los determina el software a través de la textura y la densidad aparente del suelo. En la Figura 24 se observa el desarrollo de una curva de retención mediante RETC.

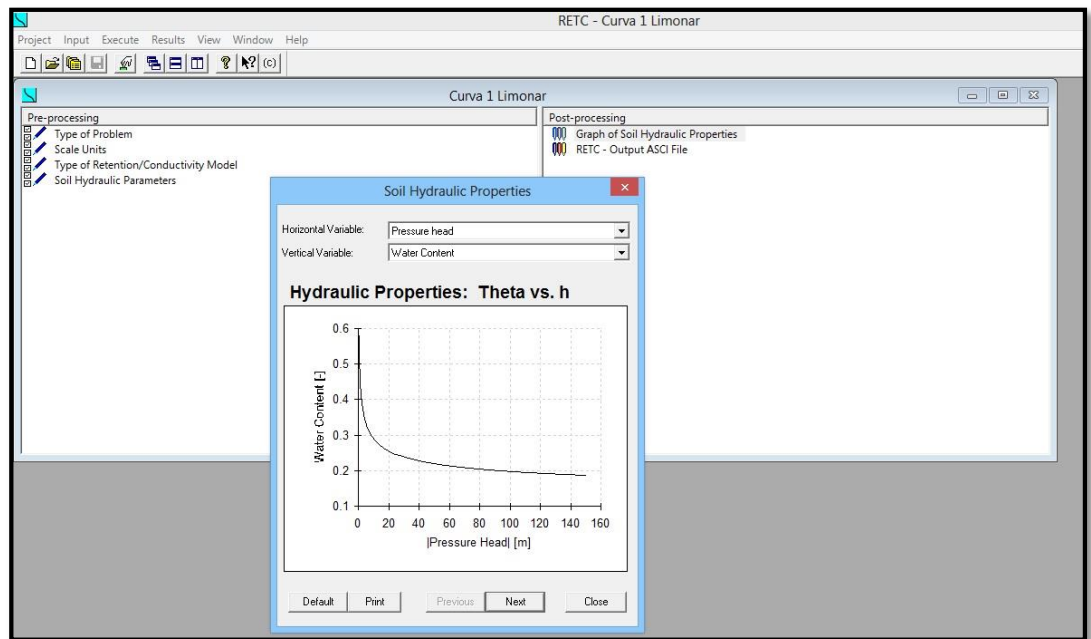


Figura 24. Esquema de la realización de una curva mediante RETC

5.3.1.5 Balance Hídrico en el Lisímetro

Siguiendo la metodología planteada por Allen *et al.* (2006) planteada en los literales 4.4.1 y 4.4.2 se realizó un balance hídrico en los 3 lisímetros. Debido a consideraciones como agregar un techo al lisímetro y tener el suelo en la zona radicular siempre a capacidad de campo, se simplificaron varias condiciones en la ecuación del balance hídrico, resultando de la siguiente manera:

$$ETc = Wi - Wf \text{ Ecuación 11}$$

Donde W_i describe la humedad a capacidad de campo del suelo depositado en el lisímetro y W_f el contenido de humedad al cual se encuentra el perfil pasado un tiempo “x” desde el último riego. Esta consideración se describe en la Figura 25:

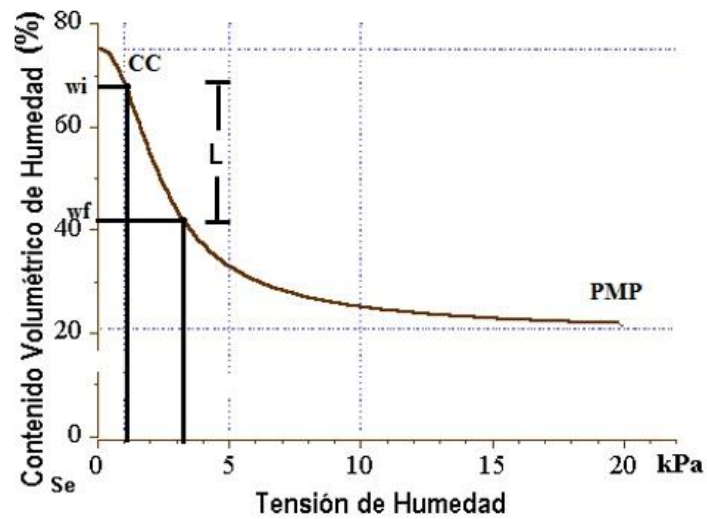


Figura 25. Factores considerados en el cambio en el contenido de humedad del suelo.

Para la investigación se consideró que el suelo en la zona radicular siempre iba a estar a capacidad de campo; cada vez que el suelo estuviera a una humedad W_f se aplicaría una lámina de agua (L) que retornara el suelo a capacidad de campo, esa lámina de agua se consideró igual a la evapotranspiración del cultivo (ET_c) en un tiempo (t) en días.

$$ET_c = L \quad \text{Ecuación 12}$$

5.3.1.6 Riego en los lisímetros

El riego de las plantas en los lisímetros se hizo de forma distinta a las del predio puesto que no fue mediante las cintas de goteo, se realizó manualmente mediante un recipiente volumétrico que permitió tener un registro de las entradas en el balance hídrico. La aplicación de riego se realizó durante toda la investigación aproximadamente día de por medio cada vez que la tensión de retención de humedad registrada por los tensiómetros sobrepasara la correspondiente a la capacidad de campo del suelo.

Durante la realización de la investigación se establecieron 3 etapas de riego teniendo en cuenta el crecimiento en el sistema radicular de la planta. Para cada una de las etapas de riego y para cada lisímetro se elaboró una tabla que indicaba el volumen a aplicar en el riego para que el suelo estuviese a capacidad de campo; el volumen aplicado estaba asociado a la tensión de retención de humedad registrada por los tensiómetros, instalados a 15 y 30 cm de profundidad en el lisímetro. Para la

elaboración de cada tabla se usó la curva de retención de humedad correspondiente a cada lisímetro y la capacidad de campo del suelo, además, se estableció un área a humedecer en cada riego determinada mediante la circunferencia proyectada por la cobertura vegetal de la planta (diámetro de sombra), como se describe en la Figura 26; el valor “x” se modificó acorde al desarrollo radicular de la planta.

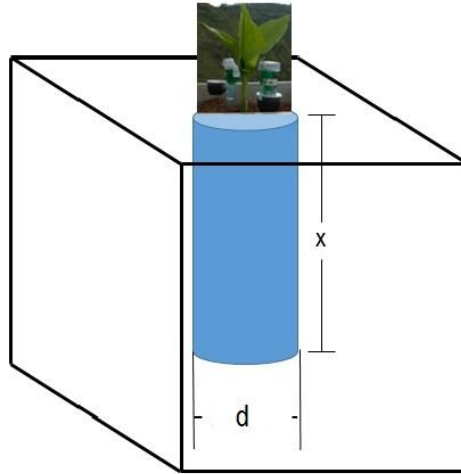


Figura 26. Esquema del volumen a humedecer alrededor de la planta.

La cantidad a regar “R” para cada tensión de retención de humedad se calculó con la siguiente expresión:

$$R = (W_i - W_f) * \left(\frac{\pi}{4} * (d^2) \right) * x \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

R: Riego [mL]

W_i: Humedad a capacidad de campo [Adimensional]

W_f: Humedad registrada por el tensiómetro [Adimensional]

d: Diámetro de humedecimiento [cm]

X: Profundidad del bulbo húmedo, modificada acorde al desarrollo de raíces [cm]

- 1ra Etapa – Inicio del desarrollo

Teniendo en cuenta la hipótesis de mantener a capacidad de campo el área aferente a las raíces, se instaló un tensiómetro a 15 cm de profundidad y se realizó la tabla de riego usando un $x=15$ cm, un diámetro de humedecimiento $d=22$ cm y la capacidad de campo se asumió como la registrada en la literatura para suelos arcillosos, correspondiente a 33 centibares medidos con el tensiómetro, hecho que se corrigió posteriormente con la realización de la prueba en laboratorio. La tabla de riego generada para esta etapa se encuentra en el ANEXO A numeral 10.1.1.

- 2da Etapa – Desarrollo vegetativo

Durante la duración de esta etapa se realizó el riego con base en la lectura registrada por un tensiómetro ubicado a 15 cm, ésa profundidad se estableció con la profundidad de raíz de una planta del cultivo que tenía la misma edad a las sembradas en los lisímetros, como se observa en la Figura 27.



Figura 27. Profundidad radicular en la etapa 2 de riego

Para el cálculo de los volúmenes de riego se usó un $x=15$ cm, un diámetro de humedecimiento $d=22$ cm y la capacidad de campo encontrada en laboratorio que correspondió a la humedad retenida a 12 centibares para el lisímetro 1, 15 centibares para el lisímetro 2 y 9 centibares para el lisímetro 3

medidos con el tensiómetro situado a 15 cm de profundidad. La tabla de riego generada para esta etapa se encuentra en el ANEXO A numeral 10.1.2.

- 3ra Etapa – Desarrollo vegetativo, floración y cosecha

Esta etapa inició en el momento en que las lecturas del tensiómetro ubicado a 30 cm empezaron a crecer de una forma acelerada, de esta forma se estimó que la profundidad de raíces ya había alcanzado esta zona y por ende estaba agotando la humedad del suelo allí (Se comprobó al momento de la cosecha esta profundidad de raíces - Figura 28). Para calcular los volúmenes de riego el diámetro de humedecimiento se mantuvo constante con respecto a la anterior etapa, el valor $x=30$ cm y los valores de capacidad de campo fueron los correspondientes a la humedad retenida a 17, 16 y 7 centibares correspondientes a los lisímetros 1,2 y 3 respectivamente. La tabla de riego generada para esta etapa se encuentra en el ANEXO A numeral 10.1.3 .



Figura 28. Profundidad radicular en la etapa 3 de riego

5.3.1.7 Evapotranspiración del cultivo

La ETc correspondió a la lámina de agua (mm) evapotranspirada por las plantas y repuesta posteriormente con el riego; teniendo registro del consumo de agua en los 3 lisímetros se procedió al cálculo de la ETc diaria con la siguiente expresión:

$$ETc = \frac{\left(\frac{R}{1000}\right)}{A} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$\therefore A = 0,4 * 0,4 = 0,16 \, m^2$$

donde:

ETc: Evapotranspiración del cultivo [mm/día]

R: Riego [mL]

A: Área correspondiente a una planta de cúrcuma en un cultivo con una distancia entre plantas de 40 cm [m²].

5.3.1.8 Labores culturales

Teniendo en cuenta que la investigación está enmarcada dentro de un proyecto productivo, las labores culturales como fertilización, control de malezas y de plagas se realizaron en los lisímetros de igual manera que la asociación de la finca las realiza en el cultivo; dado que la finca sigue los criterios de la agricultura orgánica y la agroecología sólo se usaron productos de origen orgánico.

- Fertilización

Se realizaron 4 aplicaciones a los 50, 110, 130 y 145 días después de la siembra. Las aplicaciones fueron realizadas de forma foliar y en drench por parte de la asociación propietaria de la finca.

Para las 3 primeras aplicaciones se destinaron 50 cm³/planta al drench de la fórmula descrita en la Tabla 3.

Tabla 3. Fórmula de la primera fertilización realizada a la cúrcuma.

Producto	Dosis [cm ³ /litro]
Funibiol	10
Fos - K	2,5

Green life	20
Coach	1,5
Fertibiol	20
Starmin	3

Para la fertilización a los 145 días de la siembra se realizó una aplicación foliar y una en drench, se destinaron 20 cm³/planta de las fórmulas descritas en la Tabla 4 y Tabla 5.

Tabla 4. Fórmula aplicada en Drench

Producto	Dosis [cm ³ /litro]
Funibiol	5
Fos - K	2
Starmin	5

Tabla 5. Fórmula de aplicación foliar

Producto	Dosis [cm ³ /litro]
Coach	1
Green life	3
Fertibiol	3

- Control de malezas y plagas

Con el propósito de mantener limpio el cultivo, se realizó de forma manual la labor de desyerba, con esta actividad se buscó prevenir enfermedades en la plantación. Con relación al control de plagas no fue necesario hacerlo puesto que durante el ciclo vegetativo de la planta no se evidenció presencia de algún organismo patógeno para su desarrollo.

5.3.2 Determinación de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o)

5.3.2.1 Instalación de estación climatológica portátil

Para el desarrollo de la investigación se instaló 1 estación climatológica portátil con las características de la Figura 29; ésta proporcionó datos cada dos horas de velocidad del viento, radiación solar, humedad, temperatura y horas de sol para un total de 12 registros por día. Durante los 6 meses de la

toma de datos se hizo un seguimiento riguroso por medio de visitas realizadas aproximadamente cada 8 días.



Figura 29. Esquema de una estación climatológica portátil. Fuente: <http://ag.arizona.edu/pubs/water/az1194.pdf>

5.3.2.2 Cálculo de ETo para periodos de un día

Siguiendo la metodología planteada por Allen *et al.* (2006) se calculó la ETo para periodos de tiempo de 24 horas usando la ecuación de Penman-Monteith (

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

Ecuación 6). Los

datos meteorológicos usados fueron los siguientes:

- Temperatura del aire: Temperatura máxima (Tmax) y temperatura mínima (Tmin) diaria en grados centígrados.
- Humedad del aire: el promedio diario de los datos de humedad relativa en porcentaje.
- Velocidad del viento: valores promedio diarios de la velocidad del viento en [km/día].
- Radiación: Número de horas de sol diarias.

5.4 Determinación de la curva del coeficiente de cultivo (Kc)

Teniendo un registro en el tiempo de los valores de ETo y ETc a lo largo de todas las etapas de desarrollo de la cúrcuma, se procedió a la determinación de la curva que describe el coeficiente de

cultivo usando la $Kc = \frac{ETc}{ETo}$ Ecuación 9 y la metodología descrita en el numeral 4.5.2.

Siguiendo la recomendación planteada por Puppo & García (2009) se calculó el coeficiente de cultivo para periodos de 5 días con el fin de obtener resultados más coherentes, de esta manera se hizo una sumatoria cada 5 días de la ETo y la ETc para su posterior división.

5.5 Determinación de la necesidad de riego neta (NRn) y total (NRt)

Siguiendo la metodología planteada por Pizarro (1996) se determinó la necesidad de riego neta (NRn) para periodos de 5 días, establecida como la cantidad de agua que se debe aplicar en un riego, a partir de la siguiente ecuación:

$$NR_n = ETc - Pe \text{ Ecuación 15}$$

$$\therefore Pe = P * \frac{125 - 0,2P}{125} \text{ Ecuación 16}$$

Donde NRn son las necesidades de riego [mm/día] y Pe la precipitación efectiva [mm/día]

Además de las necesidades de riego netas del cultivo, se debe considerar la necesidad de riego bruta o necesidad de riego total NRt descrita por Pizarro (1996) mediante la siguiente ecuación:

$$NR_t = \frac{NR_n}{Ea} \text{ Ecuación 17}$$

Donde NRt corresponden a las necesidades de riego totales [mm/día] y Ea es la eficiencia de aplicación (aplicación, conducción y distribución) que se asume para un sistema de riego determinado. En este caso, las NRn fueron alteradas con un coeficiente de 0,85 debido a que se diseñó conducción y distribución en riego por goteo.

5.6 Análisis estadístico.

De acuerdo al diseño completamente al azar, el modelo estadístico utilizado fue:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \text{ Ecuación 18}$$

$$i = 1, \quad j = 1,2,3$$

Donde:

y_{ij} : Evapotranspiración del cultivo (ETc) en [mm/día]

μ : Media general

τ_i : Efecto de los 3 lisímetros sobre la ETc

ε_{ij} : Error experimental debido a factores no controlados o no controlables.

Los datos se analizaron mediante una prueba no paramétrica (Test de Friedman) a un nivel de significancia ($\alpha=5\%=0,05$). Posteriormente se realizó una suavización por el método de curvas spline, además de la construcción de intervalos de confianza a la curva del coeficiente de cultivo (Kc) mediante paquete estadístico R.

6 ANÁLISIS Y RESULTADOS

6.1 Análisis de suelo

6.1.1 Textura, porosidad y densidad aparente

Las características del suelo del predio fueron determinadas mediante 9 muestras tomadas en puntos al azar por el grupo ILAMA de la Universidad del Valle (Figura 30). Se observaron las siguientes características: suelo de textura arcillosa, moderadamente pesada a muy pesada, de colores pardo rojizo a rojizo que denotan presencia de óxidos de hierro y constituyen una indicación de su edad, considerándose como relativamente viejo (Madero *et al.*, 2013); la densidad aparente y la porosidad presentan valores ideales (USDA, 1999). Los resultados de la caracterización del suelo se registran en la Tabla 6:

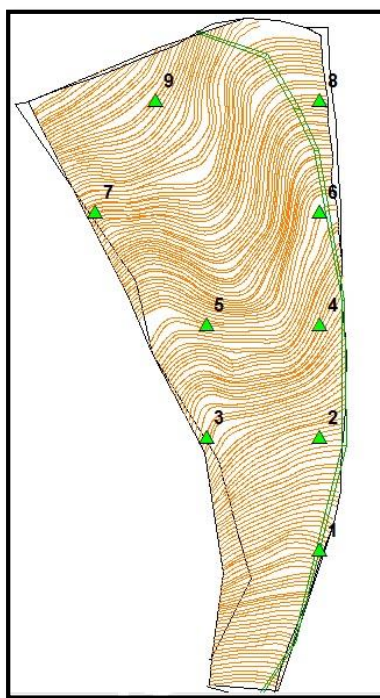


Figura 30. Puntos de muestreo de suelo

Tabla 6. Resultados de la caracterización del suelo

Punto No.	Da (g/cm ³)	A (%)	L (%)	Ar (%)	Textura	Micro (%)	Macro (%)
1	0,99	29	21	50	Ar	41,2	7,9
2	1,03	36	20	44	Ar	41,2	15,4
3	1,05	30	24	46	Ar	45,7	9,9
4	1,01	28	24	48	Ar	45,2	10,2
5	1,04	32	22	46	Ar	44,2	10,5
6	1,05	28	19	53	Ar	44,1	10,5
7	1,07	33	24	43	Ar	44,2	13,1
8	1,09	31	22	47	Ar	42,4	11,8
9	0,95	35	26	39	FrAr	43,7	13,6

6.1.2 Capacidad de Campo

Siguiendo la metodología descrita en el numeral 5.3.1.3 se determinaron dos valores de capacidad de campo para cada lisímetro, uno a 15 cm de profundidad y otro a 30 cm.

En la Tabla 7 se registran los pesos de las muestras, posterior al proceso de saturación, drenaje (PSD) durante 48 horas hasta alcanzar la capacidad de campo y secado (PSS) durante 24 horas. Teniendo estos datos se aplicó la $CC = \frac{PSD - PSS}{PSS} * 100$ Ecuación 10 y se determinó la capacidad de campo para todos los lisímetros a dos profundidades.

Tabla 7. Valores de capacidad de campo para las 6 muestras tomadas en los lisímetros

Cilindro	PSD	PSS	Peso Cilindro	CC	CC (%)
L1 _{15cm}	217,7	180	95,7	0,447	44,72
L1 _{30cm}	220,3	184,1	96,4	0,413	41,28
L2 _{15cm}	236,8	196,1	94,4	0,400	40,02
L2 _{30cm}	224	187,2	96,1	0,404	40,40
L3 _{15cm}	217,2	179,6	96,9	0,455	45,47
L3 _{30cm}	211,9	174,9	97,1	0,476	47,56

En la Tabla 8 se observan algunas medidas descriptivas de la variable “Capacidad de campo” (%). En promedio la CC para el suelo depositado en los lisímetros es de 43,24%, se encuentra además un valor mínimo de 40,02% y máximo de 47,56% con una desviación estándar de 3,1% lo que representa una variación en los resultados de 7,17%. Acorde a Rodríguez (2007) se observa alta homogeneidad en los valores de la variable “Capacidad de campo” según el coeficiente de variación (CV).

Tabla 8. Estadísticos de la variable “Capacidad de Campo” (%)

Media	Desv. Est.	Mínimo	Mediana	Máximo	CV
43,24	3,1	40,02	43	47,56	7,17

Los valores encontrados son cercanos a los valores esperados para suelos pesados o arcillosos según Pizarro (1996) y Maldonado (2001) quienes mencionan que la capacidad de campo en este tipo de suelos se aproxima a un 36% de humedad, además se observa que son muy similares la microporosidad encontrada por el grupo ILAMA para el suelo del predio (Tabla 6), hecho que es

confirmado por Pizarro (1996) cuando dice que la microporosidad es el contenido en humedad del suelo a capacidad de campo.

6.1.3 Curva de retención de humedad

Siguiendo la metodología descrita en el numeral 5.3.1.4 se determinó una curva de retención para cada lisímetro, a continuación se describen los parámetros físicos usados para la determinación de las variables del modelo de Van Genutchen (1980).

- Lisímetro 1

Teniendo en cuenta que la curva se generó mediante el modelo de Van genutchen (1980) se presentan en la Tabla 9 los parámetros físicos utilizados para la determinación de la curva de retención mediante el software RETC (Van Genutchen *et al.*, 2000). El lisímetro 1 fue ubicado al lado del punto de muestreo número 1, por esta razón se usaron los parámetros físicos encontrados en esta muestra.

Tabla 9. Parámetros físicos utilizados para la generación de la curva de retención para el lisímetro 1.

Da (g/cm³)	A(%)	L(%)	Ar(%)
0,99	29	21	50

En el ANEXO B se observa la Tabla 26 generada por el software RETC (Van Genutchen *et al.*, 2000) para la realización de la gráfica que describe la curva de retención de humedad para el lisímetro 1 (Figura 31).

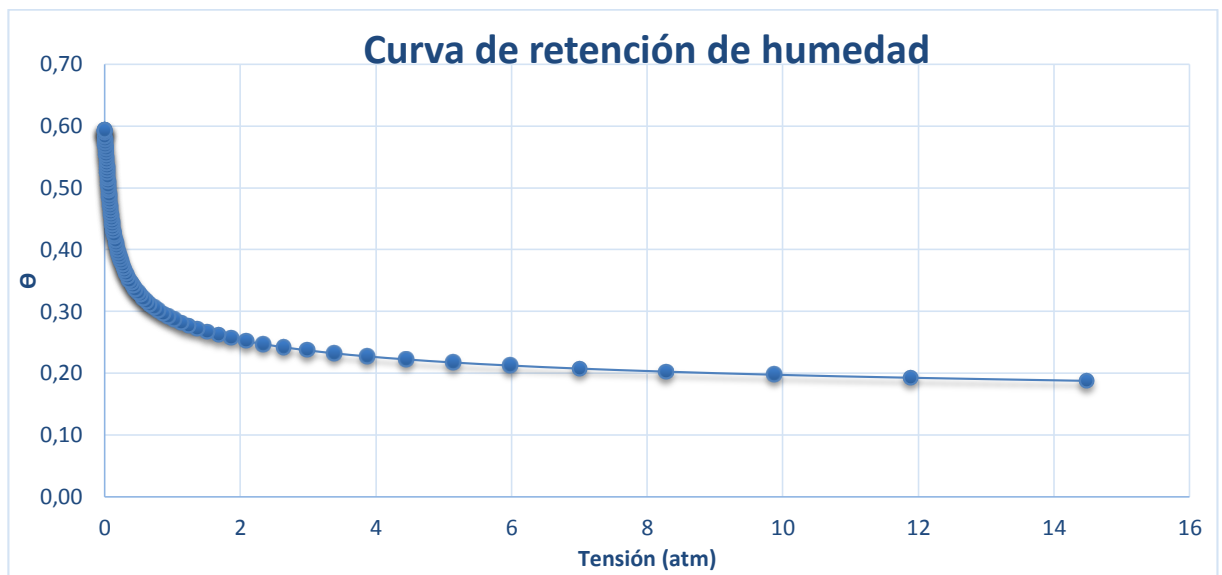


Figura 31. Curva de retención de humedad para el lisímetro 1 generada a partir del modelo de Van Genutchen (1980) con tensión en atmósferas.

Como se mencionó en el numeral 5.3.1.6 el riego se programó con base en la tensión registrada por los tensiómetros. Teniendo en cuenta que los tensiómetros registran en centibares en un rango de 0-100 cb, se generó una gráfica de retención de humedad en estas unidades y para este rango (Figura 32).

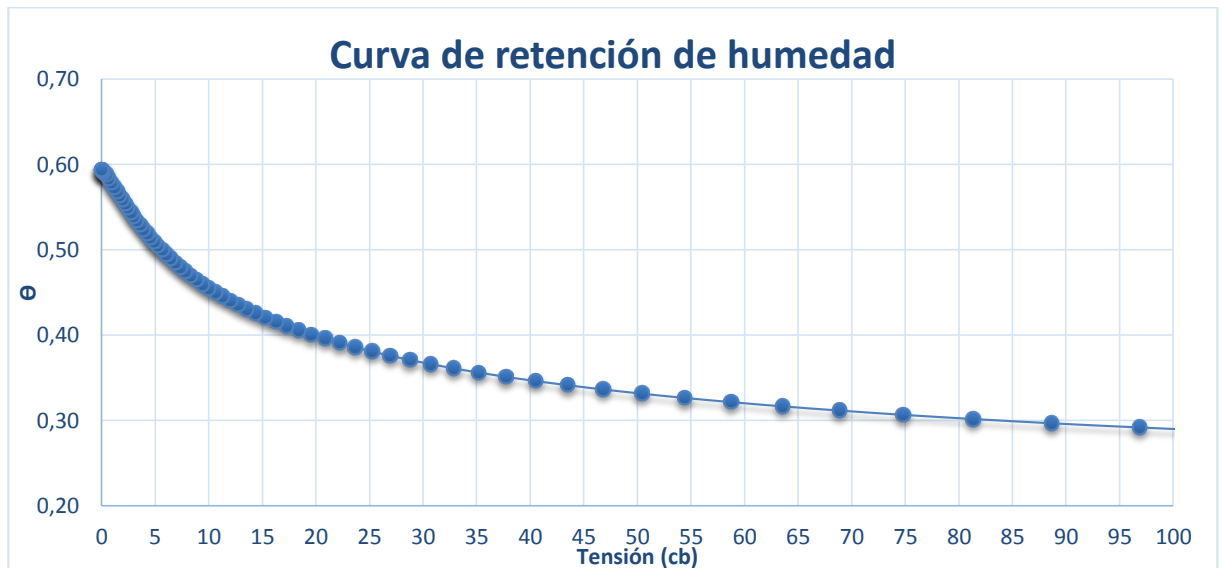


Figura 32. Curva de retención de humedad para el lisímetro 1 generada a partir del modelo de Van Genutchen (1980) con tensión en centibares.

- Lisímetro 2

El lisímetro 2 fue ubicado en medio de los puntos de muestreo 2, 3, 4 y 5, por esta razón se hizo un promedio de las variables “Densidad aparente” y los porcentajes texturales para esos 4 puntos de muestreo.

Tabla 10. Parámetros físicos utilizados para la generación de la curva de retención para el lisímetro 2

Punto	Da (g/cm ³)	A(%)	L(%)	Ar(%)
2	1,03	36	20	44
3	1,05	30	24	46
4	1,01	28	24	48
5	1,04	32	22	46
Promedio	1,03	31,50	22,50	46

En el ANEXO B se observa la Tabla 27 generada por el software RETC (Van Genutchen *et al.*, 2000) para la realización de la gráfica que describe la curva de retención de humedad para el lisímetro 2 (Figura 33).

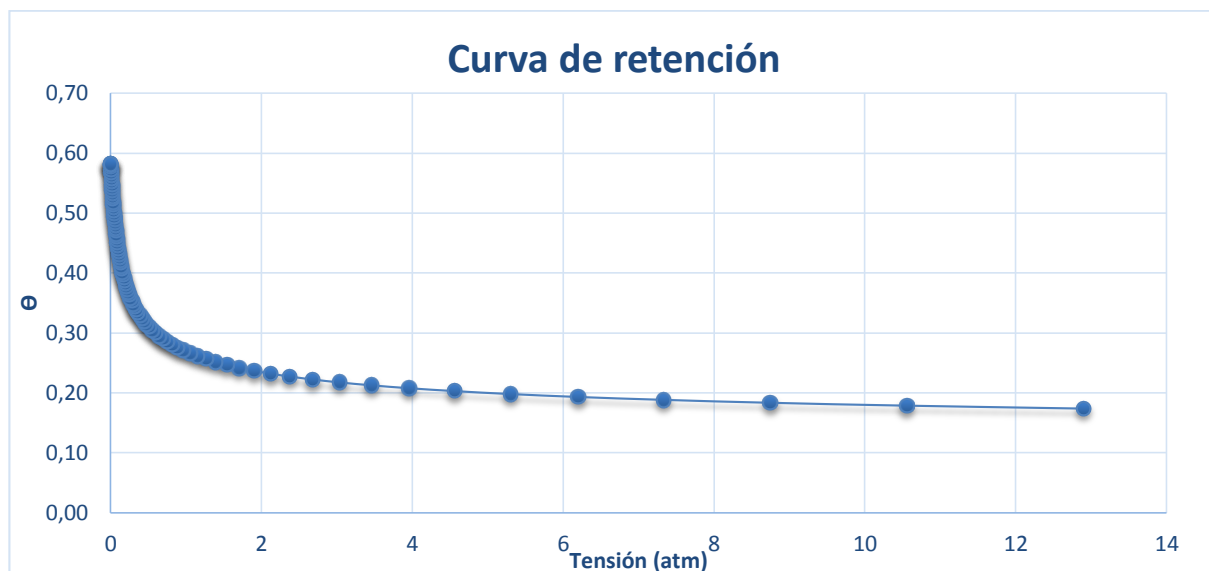


Figura 33. Curva de retención de humedad para el lisímetro 2 generada a partir del modelo de Van Genutchen (1980) con tensión en atmósferas.

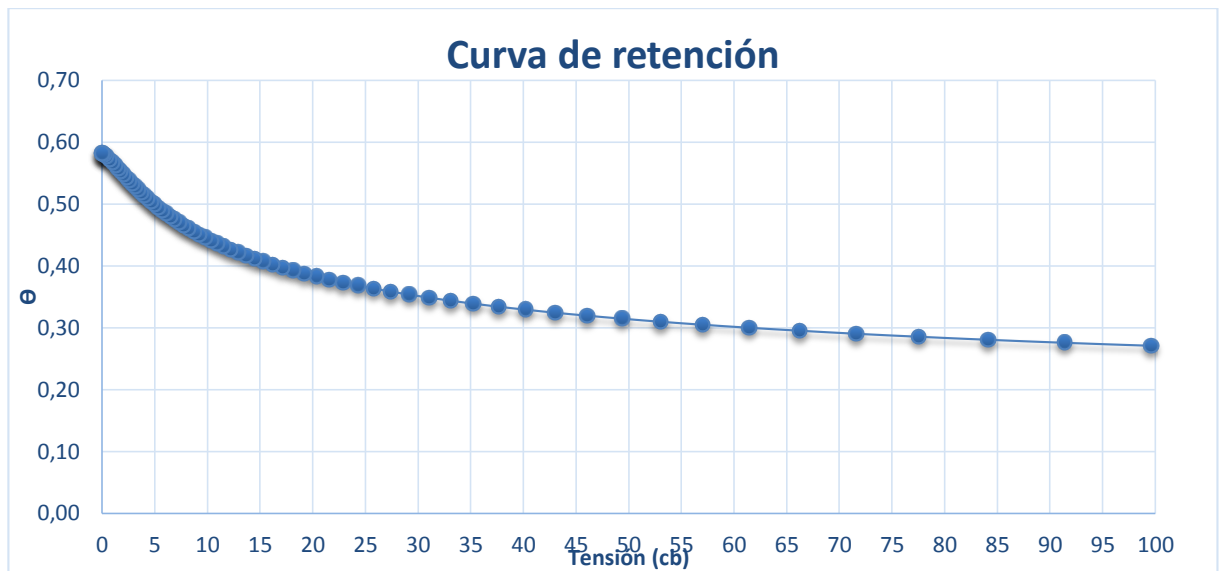


Figura 34. Curva de retención de humedad para el lisímetro 2 generada a partir del modelo de Van Genutchen (1980) con tensión en centibares.

- Lisímetro 3

El lisímetro 3 fue ubicado en un punto cercano al punto de muestreo número 8, en la Tabla 11 se registran los valores de la densidad aparente y los porcentajes texturales para generar la curva de retención para el lisímetro 3.

Tabla 11. Parámetros físicos utilizados para la generación de la curva de retención para el lisímetro 3

Da (g/cm ³)	A(%)	L(%)	Ar(%)
1,09	31	22	47

En el ANEXO B se observa la Tabla 28 generada por el software RETC (Van Genutchen *et al.*, 2000) para la realización de la gráfica que describe la curva de retención de humedad para el lisímetro 3 (Figura 35).

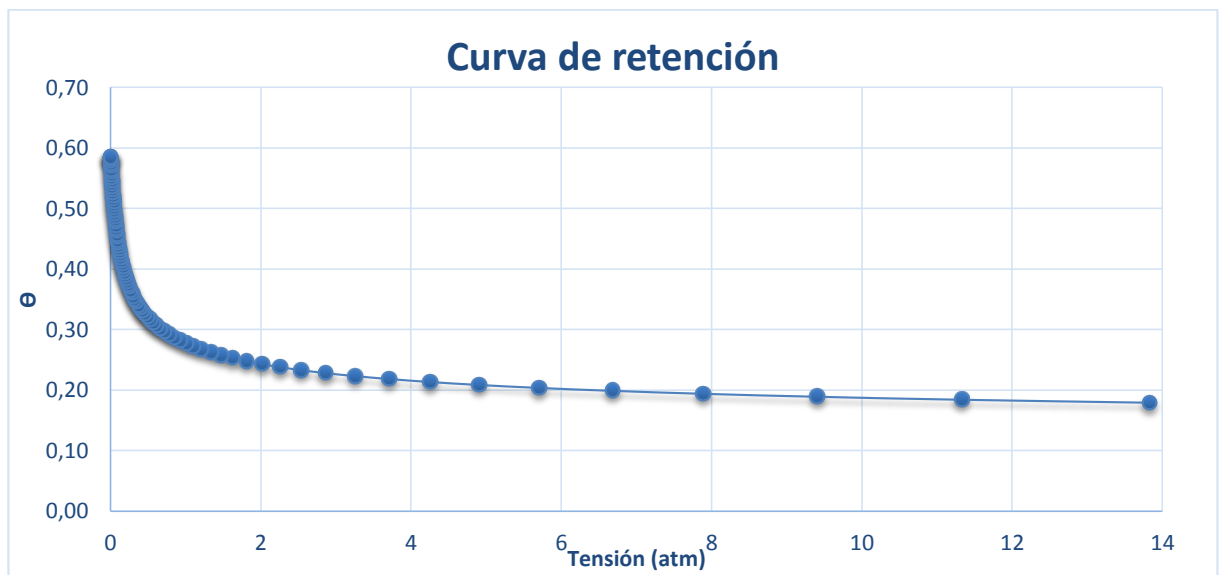


Figura 35. Curva de retención de humedad para el lisímetro 3 generada a partir del modelo de Van Genutchen (1980) con tensión en atmósferas

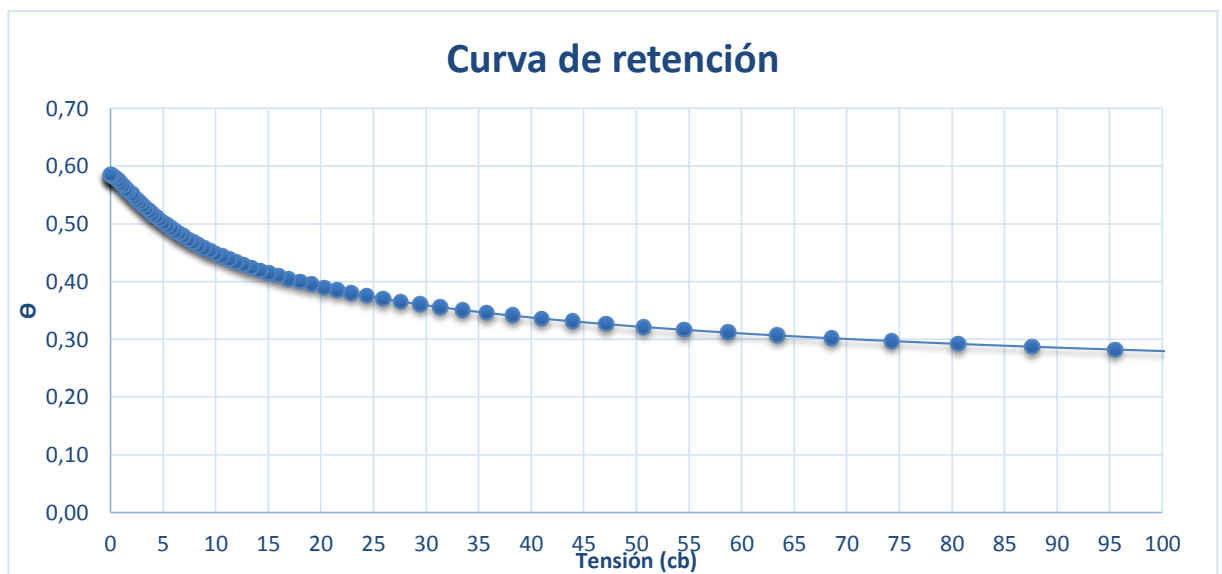


Figura 36. Curva de retención de humedad para el lisímetro 3 generada a partir del modelo de Van Genutchen (1980) con tensión en centibares.

En la Figura 37 se observan las 3 curvas de retención generadas, 1 para cada lisímetro. Se observa una alta homogeneidad entre ellas, hecho que coincide con lo encontrado por Martinez (1995), quien afirma que la capacidad de retención es una propiedad del suelo que presenta una baja a moderada variabilidad espacial.

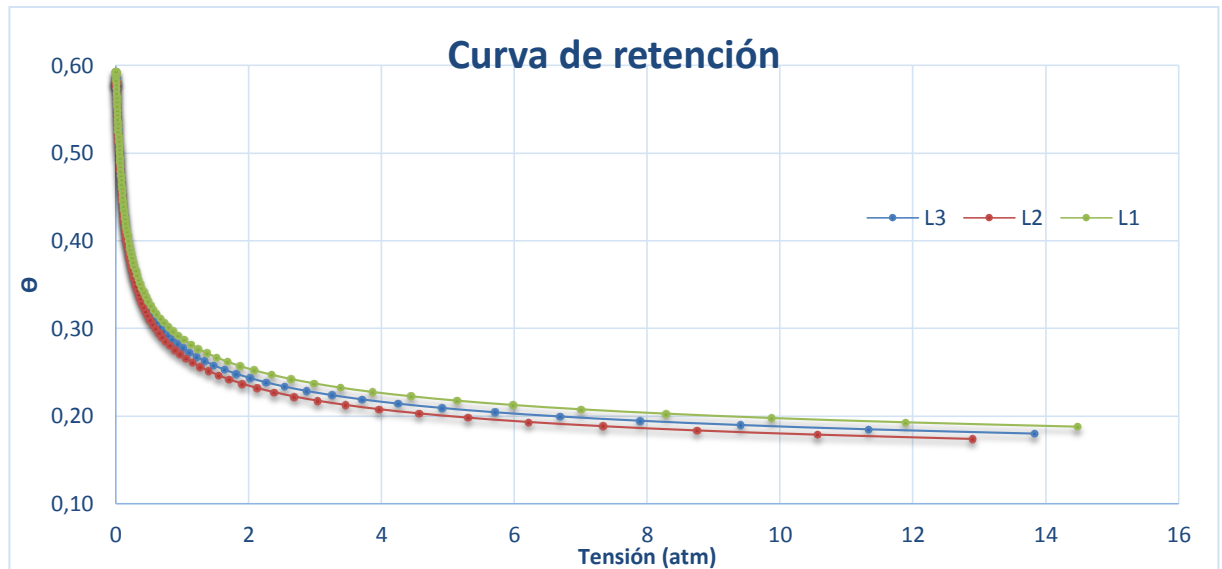


Figura 37. Curvas de retención de humedad para los 3 lisímetros con tensión en atmósferas.

6.2 Evapotranspiración del cultivo (ETc)

6.2.1 Volumen de riego aplicado en los lisímetros

Siguiendo la metodología descrita en el numeral 5.3.1.6 se realizó el riego de las plantas de los lisímetros, esta labor fue desarrollada por integrantes de la Asociación Agroecol (Propietarios del predio) con una previa capacitación en la lectura de los tensiómetros y en el registro de datos. Los volúmenes de riego aplicados se observan en el ANEXO C - Tabla 29.

6.2.2 Cálculo de la ETc

Mediante la $ETc = \frac{\left(\frac{R}{1000}\right)}{A}$ Ecuación 14 se calculó la evapotranspiración de cultivo diariamente para los 3 lisímetros usando un área equivalente a 0,16 m², siendo ésta el área correspondiente a una planta de cúrcuma con la distancia de plantación usada en la vereda Monterredondo, Dagua (DEP=0,4

m). En el ANEXO D - Tabla 30 se encuentran registrados los valores de ET_c para los 3 lisímetros a lo largo de la investigación.

En la Tabla 12 se muestran algunas medidas descriptivas de la evapotranspiración del cultivo en los 3 lisímetros. Son de resaltar los valores máximos y mínimos de ET_c a lo largo de la investigación, siendo 6,3 mm/día el máximo en el lisímetro 3 y 0,042 mm/día el mínimo en el lisímetro 1. Se observa un alto coeficiente de variación (CV) para cada lisímetro, según Rodríguez (2007) esto conlleva a que la media calculada sea poco representativa puesto que los datos sobre los cuales se determinó presentan una alta variación entre ellos. La alta dispersión en las mediciones de ET_c a lo largo de las fases fenológicas de las plantas en los lisímetros se comprueba a través de los altos valores mostrados en la desviación estándar y se debe, primero, al incremento acelerado del requerimiento hídrico de la planta a medida que avanza la fase de desarrollo y floración, y al posterior descenso del mismo cuando se está llegando a la etapa de senescencia de la planta previa a la cosecha.

Tabla 12. Estadísticos de la ET_c en los 3 lisímetros [mm/día].

Lisímetro	Media	Mediana	Varianza	Desv. Est.	Mínimo	Máximo	Rango	CV
1	1,396	1,090	1,129	1,062	0,042	4,310	4,268	0,761
2	1,884	1,560	1,239	1,113	0,125	4,060	3,935	0,591
3	1,887	1,470	2,635	1,623	0,094	6,310	6,216	0,860

Se realizó un análisis de los resultados obtenidos en la ET_c para determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas en los lisímetros, con el fin de realizar una mejor estimación del coeficiente de cultivo promedio para la zona de estudio. En la Figura 38 y Figura 39 se observan los estadísticos de prueba para validar los supuestos de normalidad (Shapiro-Wilk) y homocedasticidad (Levene) para comparar diferencias entre los resultados mediante un análisis de varianza (ANOVA) a un nivel de significancia del 5%. Es evidente que el valor P de las pruebas Shapiro-Wilk y Levene es menor a 0,05 por lo tanto los datos no se comportan de manera normal, ni son homocedásticos, razón por la cual no se puede aplicar un ANOVA. Debido a esto se aplicó una prueba no paramétrica para determinar diferencias entre los resultados obtenidos en cada lisímetro, para ello se usó la prueba de Friedman; en la Tabla 13 se observa el resultado y se confirma que

existen diferencias estadísticamente significativas en los resultados obtenidos en los lisímetros (Valor $P < 0,05$). Para saber que lisímetro presentó la diferencia en los resultados se realizó una comparación entre pares (Tabla 14) y se encontraron diferencias estadísticamente significativas en el lisímetro 1 con respecto al 2 y 3 (Valor P al comparar $L2$ y $L3 > 0,05$); esto coincide con lo observado en campo donde la planta de este lisímetro tuvo un menor y más lento desarrollo, afectada principalmente por el golpe de viento que ocurre con mayor frecuencia en la parte alta del predio (Lugar donde se ubicó el lisímetro 1 – Ver Figura 19). Teniendo en cuenta el análisis estadístico, la determinación del K_c promedio y la ET_c promedio se realizó a partir de los resultados obtenidos en los lisímetros 2 y 3.

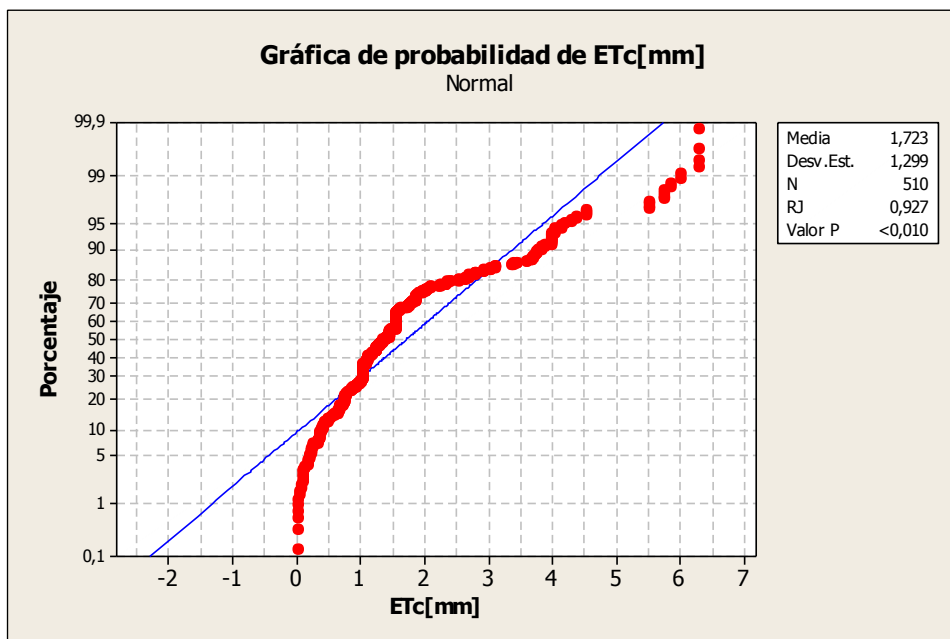


Figura 38. Prueba de normalidad (Test de Shapiro – Wilk)

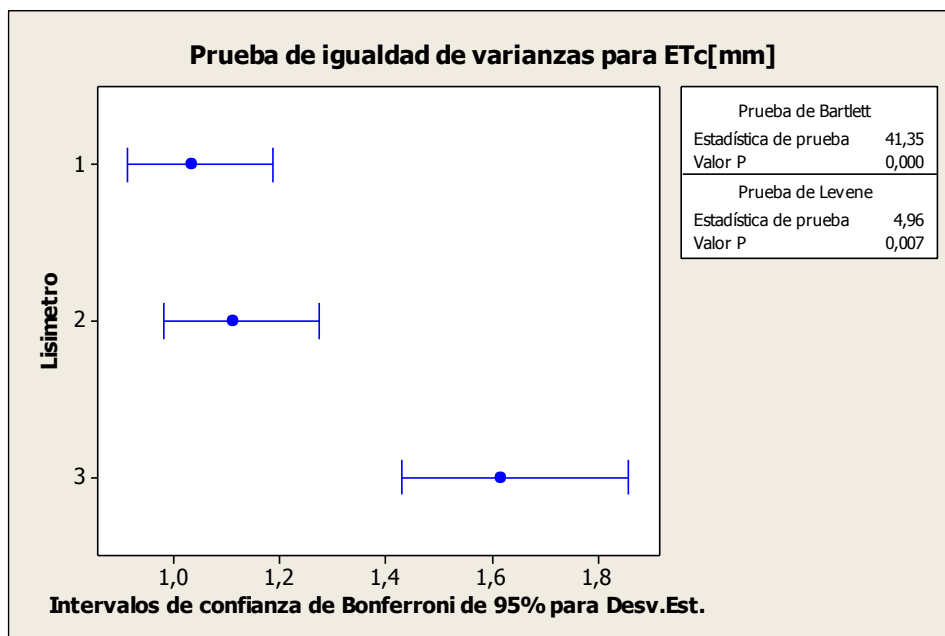


Figura 39. Prueba de homocedasticidad (Test de Levene)

Tabla 13. Resultados de la prueba de Friedman

Prueba de Friedman: ETc [mm/día] vs. Lisímetro bloqueado por T

S = 80,16	GL = 2	P = 0,000
S = 89,80	GL = 2	P = 0,000 (ajustados para los vínculos)

Tabla 14. Comparación entre lisímetros.

Prueba de Friedman: ETc [mm/día] vs. Lisímetros 2 y 3

S = 0,29	GL = 1	P = 0,591
S = 0,35	GL = 1	P = 0,556 (ajustados para los vínculos)

En la Figura 40 se observa la evapotranspiración del cultivo promedio en los lisímetros 2 y 3; se evidenció gran variabilidad en los requerimientos hídricos de las plantas de cúrcuma a lo largo de la investigación. Durante el inicio de la segunda fase fenológica del cultivo la ETc tuvo como valor máximo promedio 0,73 mm/día hasta llegar al día 24 después del trasplante (DDT) donde se observó un crecimiento homogéneo en la ETc hasta 82 DDT alcanzando un valor máximo promedio de 1,91 mm/día, posteriormente se evidenció un crecimiento acelerado de la ETc entre los 83 DDT y 142 DDT

donde el requerimiento hídrico máximo promedio alcanzó un valor 5,16 mm/día; en la etapa final se observa una disminución esperada de la ETc cuando la planta entra al periodo de senescencia previo a la cosecha entre los 143 y 170 DDT, alcanzando un valor máximo promedio de 1,56 mm/día. En todos los lisímetros el valor más bajo de ETc se obtuvo en el inicio de la segunda etapa de desarrollo y el más alto al final de la misma y durante la floración.

Los resultados obtenidos de la ETc se asemejan a lo mencionado por Ravindran *et al.* (2007), quienes reportan valores entre 4,1 y 4,5 mm/día como el requerimiento hídrico de la cúrcuma; también se observó un comportamiento similar al mencionado por Prabhakaran (2013) quién asegura que el requerimiento hídrico varía entre 3,61 y 4,16 mm/día. La leve variación entre los valores de ETc medidos en campo y los valores reportados por los autores mencionados se atribuye principalmente a la diferencia en las condiciones edafoclimáticas entre la zona rural de Dagua y el sur-sudeste de India (Para Latinoamérica no se reportan investigaciones acerca del requerimiento hídrico de esta planta).

La ETc máxima promedio encontrada también se asemeja al requerimiento pico del Jengibre encontrado por Kandiannan *et al.* (2002), quienes reportan un requerimiento pico de 6,33 mm/día. El jengibre pertenece a la misma familia de la cúrcuma y tiene un hábitat y crecimiento similar (Kandiannan *et al.*, 2002).

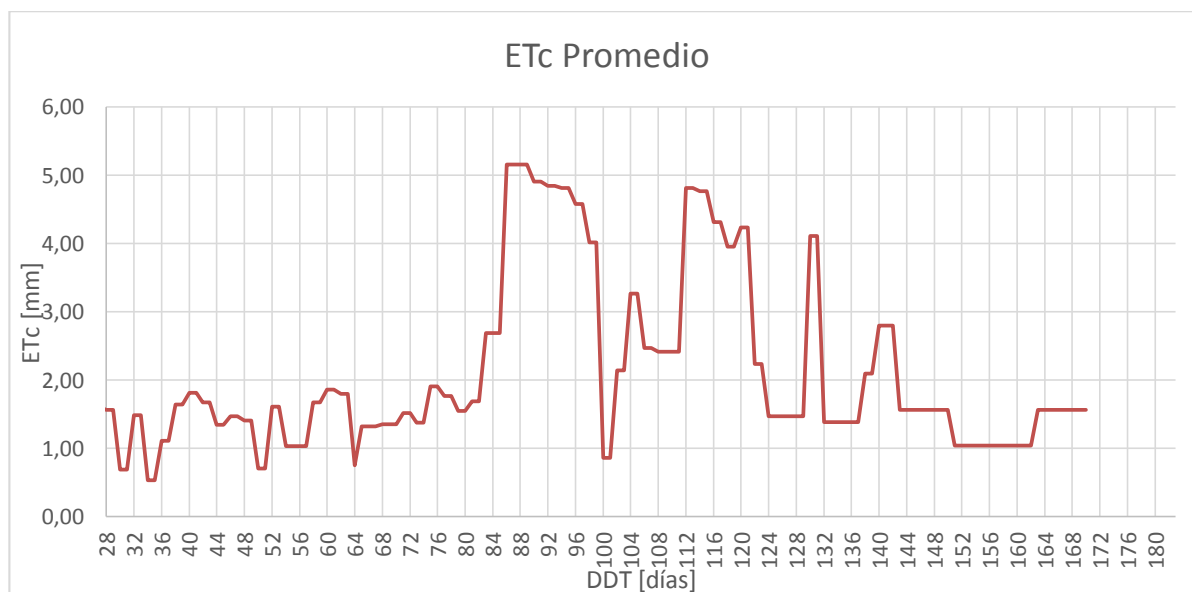


Figura 40. Evapotranspiración del cultivo promediada a partir de los resultados obtenidos en los lisímetros 2 y 3.

6.3 Evapotranspiración de Referencia (ET_o)

La evapotranspiración de referencia (ET_o) media diaria fue estimada mediante el método FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2006), con datos meteorológicos obtenidos mediante la estación climatológica portátil Davis Vantage Pro Plus, ubicada a pocos metros de la plantación de cúrcuma; en el ANEXO D - Tabla 31 se observan los valores de ET_o a lo largo de la investigación.

En la Tabla 15 se observan algunas medidas descriptivas de la variable “Evapotranspiración de referencia” [mm/día]. En promedio la ET_o a lo largo de la investigación fue de 3,76 mm/día, se encontró además un valor mínimo de 1,75 mm/día y máximo de 5,20 mm/día con una desviación estándar de 0,52, este resultado indica que la ET_o tuvo poca influencia en la variación del coeficiente de cultivo (K_c). Acorde a Rodríguez (2007) se presentó homogeneidad en los valores de la ET_o según el coeficiente de variación (CV) entre los meses de octubre/2014 y abril/2015.

Tabla 15. Estadísticos de la variable “Evapotranspiración de referencia” [mm/día].

Media	Desv. Est.	Varianza	Mínimo	Máximo	CV(%)
3,76	0,52	0,27	1,75	5,20	13,71

En la Tabla 16 se presentan los valores promedio de las variables climáticas requeridas por el método FAO Penman-Monteith y de la ET_o durante el cultivo de cúrcuma (21-October-2014 a 8-Abril-2015); para los meses de octubre y abril solo se tienen datos climáticos de 11 y 8 días respectivamente, sin embargo se observa alta homogeneidad con respecto a los otros meses. Los datos de evapotranspiración mensual total coinciden con lo reportado por Gonzales *et al.* (2002) para los mismos meses de la investigación en la zona de Dagua, Valle del Cauca. En los 170 días en los cuales transcurrió la investigación la evapotranspiración de referencia total fue de 638,82 mm.

Tabla 16. Variables climáticas medidas con la estación portátil, ET_o media mensual y ET_o mensual total.

Mes	días	T min (°C)	T max (°C)	Humedad (%)	Viento (Km/día)	Insolación (Hr)	ET _o (mm/día)	ET _o (mm)
octubre	11	17,54	26,12	88,49	103,65	8,91	4,21	46,31
noviembre	30	17,23	25,04	90,00	94,77	8,90	3,83	114,92
diciembre	31	19,36	21,18	89,65	106,13	8,71	3,66	113,50
enero	31	19,68	21,18	88,12	128,08	9,16	3,79	117,40
febrero	28	19,61	21,15	88,15	129,06	8,57	3,67	102,64
marzo	31	19,72	21,25	87,99	120,16	8,84	3,69	114,49

abril	8	19,87	21,41	89,28	110,75	8,50	3,70	29,56
							Total	638,82

En la Figura 41 se puede observar una comparación entre la ETo y la precipitación diaria registrada por la estación; es evidente que durante las fases fenológicas de las plantas, en promedio, no hubo variación significativa en los valores de ETo. En promedio, se obtuvieron resultados del orden de 3,77 mm/día en el periodo hasta los 119 DDT (Fase II), 3,71 mm/día en el periodo entre 120 y 141 DDT (Fase III) y 3,75 mm/día en el periodo entre los 142 y 170 DDT (Fase IV)

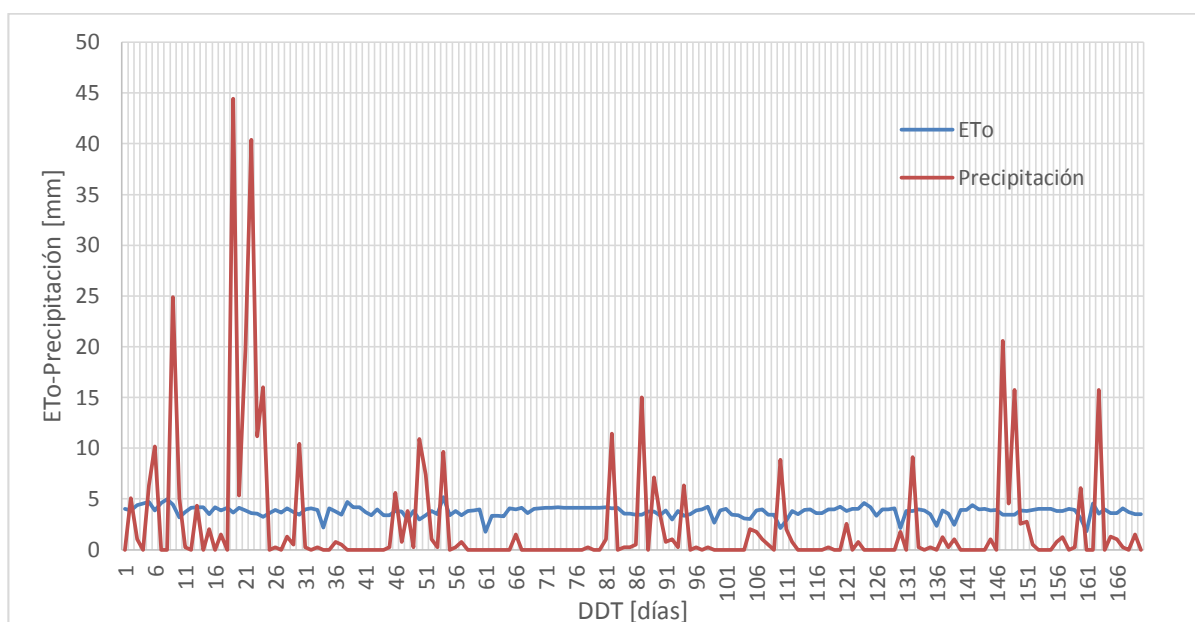


Figura 41. Comparación entre la precipitación y la evapotranspiración de referencia (ETo).

6.4 Curva del coeficiente de cultivo (Kc)

Siguiendo la metodología descrita en el numeral 5.4 se determinaron los valores del coeficiente de cultivo para todas las etapas fenológicas de la cúrcuma. En la Tabla 32 se observan los resultados de los Kc para periodos de 5 días, señalando a qué día después del trasplante (DDT) corresponde. Los datos se graficaron y se realizó una tendencia mediante suavización Spline para cada lisímetro, en la Figura 42 se observa el comportamiento del Kc en relación a los días después del trasplante (DDT). Para la etapa II de desarrollo el Kc fue de 0,51, para la etapa III de 1 y para la etapa IV de 0,38, lo que coincide con lo esperado, dado el crecimiento del requerimiento hidrico al final de la etapa de desarrollo

y durante la floración, además de la disminución en el consumo de agua en la etapa IV por causa de la senescencia de la planta previa a la cosecha

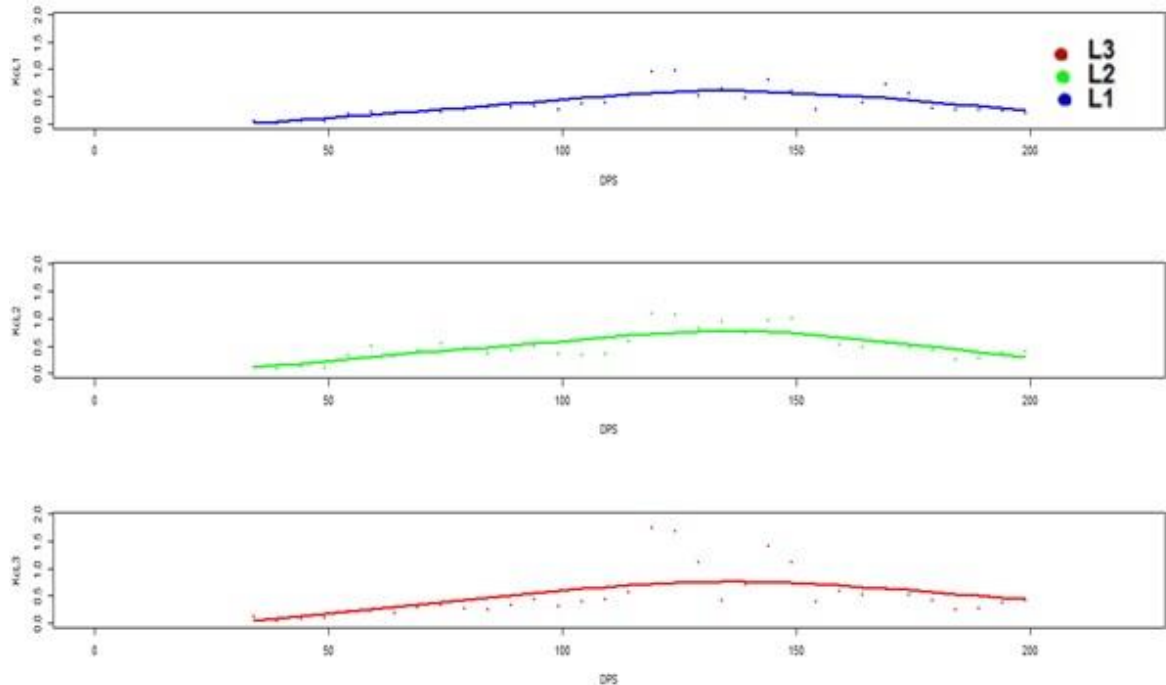


Figura 42. Valores de Kc determinados para cada lisímetro para periodos de 5 días.

En la Figura 43 se observan las curvas de Kc para cada lisímetro; en esta gráfica es evidente la diferencia presentada entre el lisímetro 1 con respecto a los otros 2. Por esta razón y el análisis estadístico de la ETc anteriormente realizado, la curva del coeficiente de cultivo se realizó a partir del promedio entre los resultados obtenidos en los lisímetros 2 y 3. En la Figura 44 se observa el resultado final de la curva del coeficiente de cultivo determinada experimentalmente en la zona rural de Dagua, Valle del Cauca teniendo valores de 0,11, 1,06 y 0,36 como K_{cini} , K_{cmed} y K_{cfin} respectivamente; además se realizaron intervalos de confianza en los periodos de desarrollo fenológico de las plantas que permiten estimar el Kc para zonas con condiciones edafoclimáticas distintas a las presentadas en este estudio.

Los valores de Kc obtenidos para las tres etapas se comportan de manera similar a lo presentado por Allen *et al.* (2006) en la Figura 12, teniendo en cuenta que el K_{cini} presenta un valor menor al K_{cmed} , y este presenta a su vez un valor mayor al K_{cfin} , esto se atribuye a los cambios experimentados por la planta y al cambio en el diámetro de sombra (cobertura del suelo) que aumenta en las etapas II y III de desarrollo.

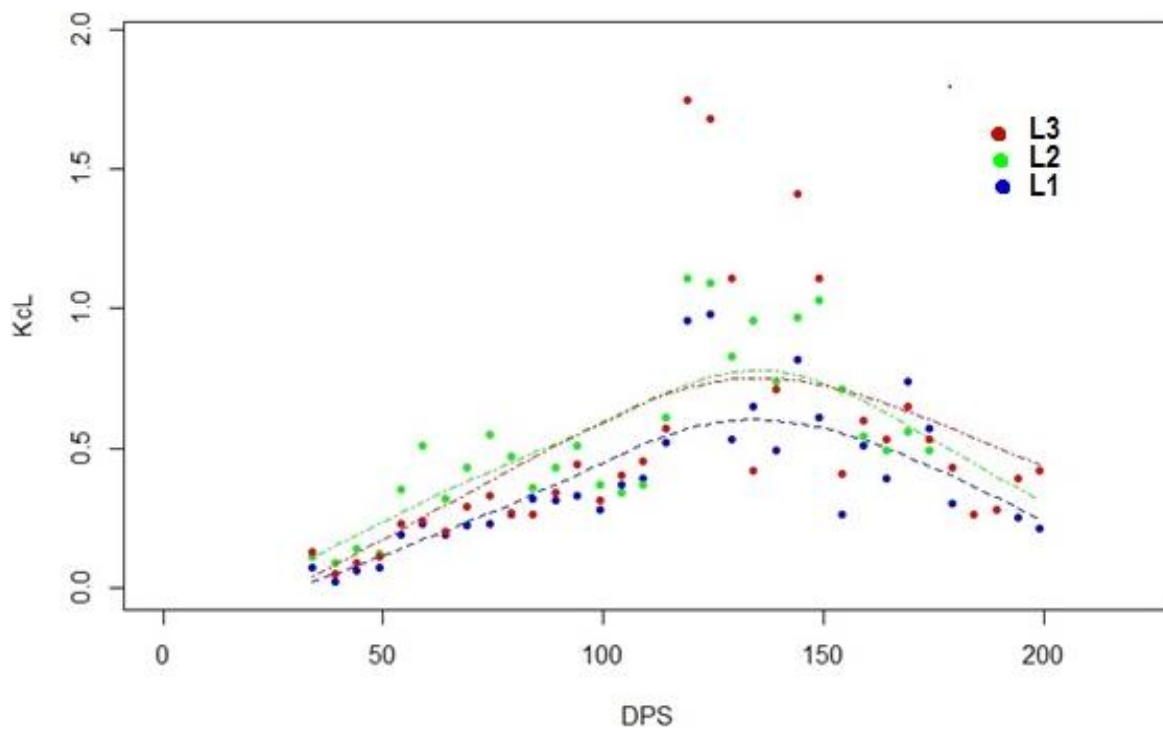


Figura 43. Curvas de K_c de los 3 lisímetros suavizada mediante Splines.

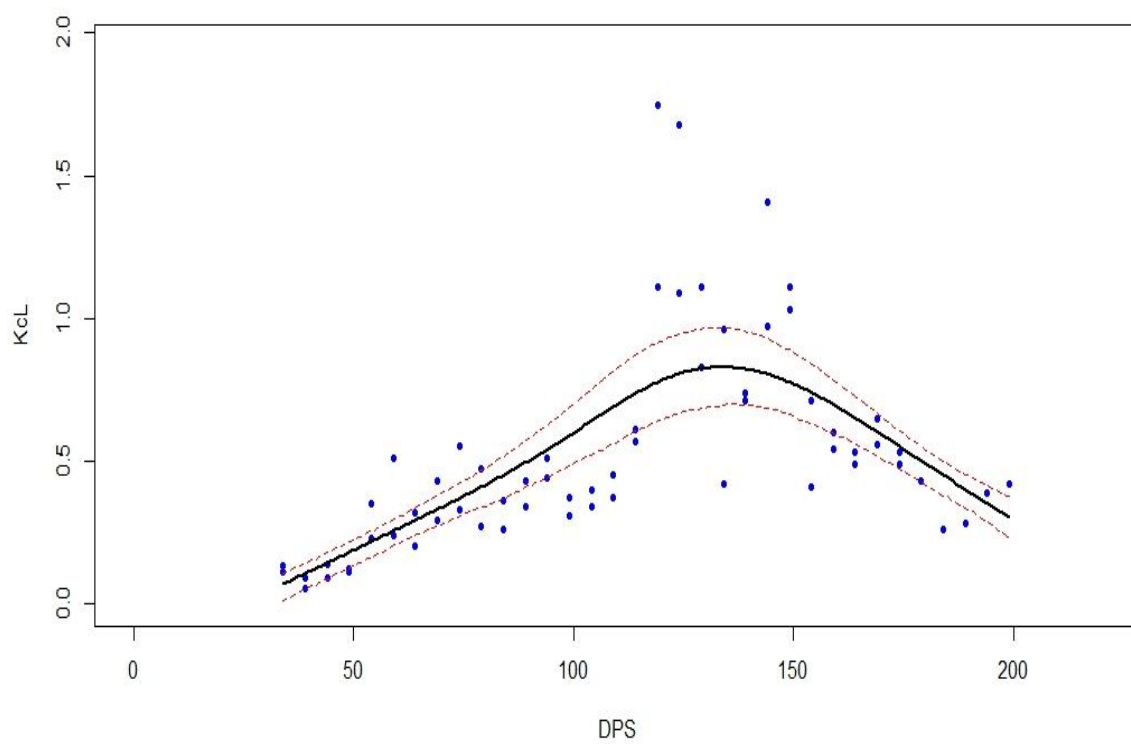


Figura 44. Curva del coeficiente de cultivo de la cúrcuma e intervalos de confianza.

6.5 Necesidades de riego netas y totales para la Cúrcuma

Con la metodología descrita en el numeral 5.5, se calculó la precipitación efectiva a partir de la precipitación registrada por la estación climatológica portátil, para la posterior determinación de la NRn y NRt para la cúrcuma, en los meses durante los cuales se llevó a cabo la investigación. En la Figura 45 se observa el comportamiento de la precipitación efectiva, la necesidad de riego neta y la ETc (Las 3 variables fueron calculadas para periodos de 5 días). La NRn obtenida en la presente investigación para las plantas del predio corresponde a 176,21 mm distribuidos en 170 días de duración de la investigación. Teniendo en cuenta que en el predio de la Asociación Agroecol se encuentra establecido un sistema de riego por goteo, se fijó un valor de 0,85 como eficiencia de aplicación para la determinación de la NRt, y se obtuvo un valor de 207,31 mm, siendo éste el valor real a aplicar teniendo en cuenta las pérdidas en el sistema. De la Figura 45 se observa que los meses de Enero y Febrero presentan el mayor requerimiento por riego para suplir los requerimientos hídricos de la planta, estos meses coincidieron con el final de la etapa II de desarrollo y el inicio de la floración, donde el consumo de agua esperado era mayor con respecto a las otras etapas de desarrollo.

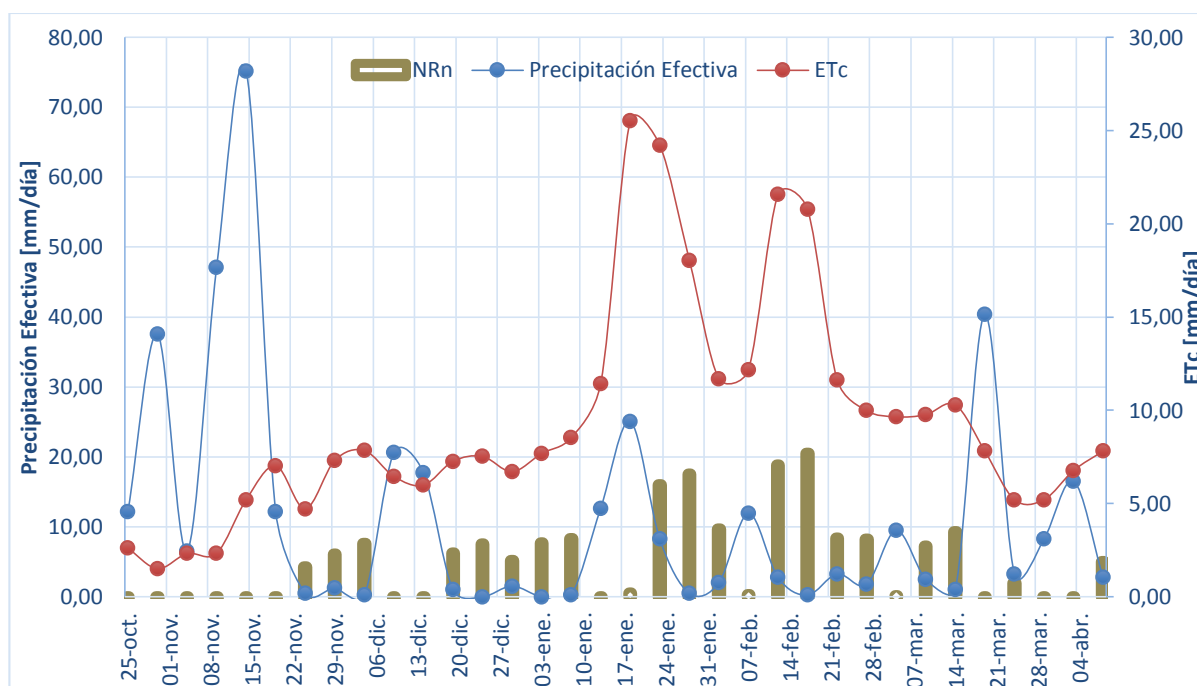


Figura 45. Relación entre la precipitación efectiva y la ETc para el cálculo de la necesidad de riego neta para periodos de 5 días a lo largo de la investigación.

7 CONCLUSIONES

- Es factible la utilización de lisímetros de drenaje en la determinación de la evapotranspiración de cultivo (ET_c) para el cultivo de cúrcuma bajo las condiciones edafoclimáticas de la vereda Monteredondo, corregimiento del Limonar, Dagua, pues presentan ventajas económicas y prácticas en la metodología de mediciones con respecto a otros métodos de estimación del requerimiento hídrico.
- Los resultados obtenidos en la presente investigación muestran que el coeficiente de cultivo tuvo un comportamiento creciente entre las etapas II y III y un posterior descenso al inicio de la etapa IV correspondiente a la cosecha; se obtuvieron valores de K_c de 0,51 en la fase II (entre los 1 y 114 DDT); 1 en la fase III (entre los 115 y 135 DDT) y un descenso a 0,38 en la fase IV (entre los 136 y 170 DDT). Para la curva de K_c y siguiendo el método planteado por la FAO se determinaron valores de 0,11, 1,06 y 0,36 como K_{cini}, K_{cmed} y K_{cfin} respectivamente.
- Se determinó el requerimiento hídrico máximo durante todo el ciclo fenológico de las plantas encontrándose un valor de ET_c máximo promedio correspondiente a 5,16 mm/día. Acorde a la necesidad de riego neta se concluye, que para los meses de realización de la investigación, se requiere un aporte de 176,21 mm de agua mediante riego para lograr un buen desarrollo fisiológico en la plantación.

8 RECOMENDACIONES

- Realizar futuros estudios en temas de fisiología de la cúrcuma, donde se analice a profundidad el desarrollo radicular de esta planta, pues es una variable muy importante a la hora de la planeación y diseño de riego de la cual no se encuentra mucha información.
- La siembra y generación de barreras vivas en el predio perteneciente a la asociación “Agroecol” que permitan disipar el golpe de viento que afecta de manera drástica el desarrollo de la plantación, especialmente en la parte alta del lote.
- Determinar el requerimiento hídrico y el coeficiente de cultivo en la primera etapa fenológica de desarrollo correspondiente a la germinación, pues en el presente estudio la toma de datos inició a partir del trasplante de las plantas a los lisímetros.
- Se recomienda, para el cultivo de cúrcuma en la zona de Dagua, la utilización de los valores de Kc presentados en este trabajo como herramienta para la programación del riego y la prevención de un posible déficit hídrico y una consecuente disminución en la producción de rizomas.

9 BIBLIOGRAFIA

- Allen, R., Pereira, L., 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. Roma
- Camargo, A., Camargo, M. 2000. *Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial*. Bragantia, Campinas, Brasil.
- Carvalho, D., Silva, L., Guerra, J., Cruz, F., Souza, A. 2007. *Instalação, calibração e funcionamento de um lisímetro de pesagem*. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.27, n.2, p.363-372. Brasil.
- CCI (Corporación Colombia internacional), 2006. *Plan Hortícola Nacional (PHN)*, p. 321-339. Corporación Colombia Internacional, Colombia.
- CEI (Centro de exportaciones e importaciones), 2012. *Perfil de mercado de cúrcuma*. Centro de exportaciones e importaciones Nicaragua. Disponible en: http://www.cei.org.ni/images/file/mercado_%20curcuma_%20canales%20comercializacion.pdf. Consultado 15/01/2014.
- Cely, G. 2010. *Determinación de parámetros de riego para el cultivo de cebolla de bulbo en el distrito de riego del alto chicamocha*. Universidad nacional de Colombia, Facultad de agronomía, escuela de posgrados, maestría en ciencias agrarias, Bogotá, Colombia.
- Chavarri, E. 2004. *Clase VII: evapotranspiración*, Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de ingeniería agrícola, Departamento de recursos de agua y tierra, curso: hidrología aplicada, Lima, Perú.
- Chaves, S., Moreira de Azevedo, B., De Medeiros, J., Lima, F., Batista, N. 2005. *Evapotranspiração e coeficiente de cultivo da pimenteira em lisímetro de drenagem*. Revista Ciência Agronômica, v.36, n.3, p. 262-267. Centro de Ciências Agrárias - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil
- DANE, 2013. *Exportaciones según principales capítulos del arancel y principales partidas arancelarias, cuadro 17*, Bogotá, Colombia.
- De Faria, R., Campeche, F., Chibana, E. 2005. *Construção e calibração de lisímetros de alta precisão*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.10, n.1, p.237-242, Campina Grande, PB, DEAg/UFCG, Brasil.
- Delgado, G. 2012. *Determinación de la lámina de riego para el cultivo de la albahaca genovesa (Ocimum basilicum "Genovese") a partir de la variación del coeficiente multiplicador de la evapotranspiración*. Universidad del Valle, Cali, Colombia
- De Santa, F., López, P., Calera, A. 2005. *Agua y Agronomía*. Ediciones Mundi-Prensa, Pág. 175, 241-249.

De Souza, A., De Carvalho, D., Batista, L., De Almeida, F., Soares da Rocha, H. 2011. *Estimativas da evapotranspiração de referência em diferentes condições de nebulosidade*. Pesq. agropec. bras., Brasília, v.46, n.3, p.219-228. Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais - Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil.

Díaz, J., Ávila, L. 2002. *Sondeo del mercado mundial de Cúrcuma (Cúrcuma longa L.)*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos "Alexander von Humboldt", Bogotá, Colombia. 28 pp

FAO, 2002. *Agua y Cultivos, Logrando el uso óptimo del agua en la agricultura*. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. Roma, Italia.

Gonzales, W., Pino, C., Quintero, D., Benitez, L. 2002. *Plan básico de ordenamiento territorial PBOT 2001-2009*. Dagua, Valle del Cauca, Colombia.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, 2010. *Estudio nacional del agua*. Cap. 5, p. 175-176. Bogotá, Colombia.

Irmak, S; Haman, D. 2003. *Evapotranspiration: Potential or Reference?* University of Florida. Disponible en: <http://edis.ifas.ufl.edu/pdffiles/AE/AE25600.pdf>. Consultado 15/01/2014.

Jaramillo J., (2002). *Introducción a la Ciencia del Suelo*. Universidad Nacional de Colombia, p. 220-223, Medellín, Colombia.

Jiménez, H. 1986. *Hidrología I*. Facultad de Ingeniería, Departamento de mecánica de fluidos y ciencias térmicas, Universidad del Valle, Ed II, Pág. 122.

Kandiannan, K., Chandaragiri, K., Sankaran, N., Balasubramanian, T., Kailasam, C. 2002. *Crop-weather model for turmeric yield forecasting for Coimbatore district, Tamil Nadu, India*. Agricultural and Forest Meteorology, Ed. 112, Pag. 133–137.

López-Canteñs, G., Herrera, J., Ostos, A., Lizarraga, L., Hernández, J. 2010. *Aplicación de modelos matemáticos para la obtención de la curva de retención de humedad del suelo*. Revista Latinoamericana de Recursos Naturales 6 (1): 44-50.

Madero, E., Lora, R., Valenzuela, I., Torrente, A., Castro, H., Gómez, I., García, A., Zapata, R., Osorio, N., Varela, A., Rueda, D., Munévar, F., Sánchez, J., Burbano, H. 2013. *Ciencia del Suelo: Principios Básicos*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Pág. 139-171.

Maldonado, I. 2001. *El agua y la producción de trigo en la VII región*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Revista Tierra Adentro N°40, Chile.

Martinez, J. 1995. *Medida de curvas de retención de humedad en laboratorio y su estimación*. Departamento de geografía, Universidad de Salamanca, Salamanca, España.

Medeiros, G., Bussmeyer, F., Sakai, E. 2004. *Relações entre o coeficiente de cultura e cobertura vegetal do feijoeiro: erros envolvidos e análises para diferentes intervalos de tempo*. Acta Scientiarum Agronomy, v. 26, n. 4, p. 513-519, Maringá, PA, Brasil.

Mesa, M. D.; Ramírez, M. C.; Aguilera, C. M.; Ramírez-Boscá, A., Gil, A. 2000. *Efectos farmacológicos y nutricionales de los extractos de Curcuma longa L. y de los cucuminoides*. Ars Pharmaceutica, Departamento de Bioquímica y Biología Molecular. Instituto de Nutrición y Tecnología de Alimentos. Ramón y Cajal, Ars Pharmaceutica, 41:3; Pag. 307-321.

Montaño, C., Montes, L. 2004. *Evaluación sistémica de las potencialidades empresariales a partir de la cúrcuma longa en el departamento de Caldas*. Universidad nacional de Colombia, Manizales, Colombia.

Moret, D., Arrúe, M., López, M., Gracia, R., Fuentes, J., Salvador, M. 2007. *Determinación del perfil de humedad del suelo utilizando una sola sonda TDR: El método del nomograma*. Departamento de Suelo y Agua, Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Zaragoza, España.

Pizarro, F. 1996. *Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF) goteo, microaspersión, exudación*. Editorial Mundi-Prensa, 3ra edición, Pág. 25, 164, 481.

PPIC, 2001. *Nutrient removal by crops*. Potash & phosphate institute of Canada-India, Fertilizer knowledge No.1, 4 pp.

Prabhakaran, N. 2013. *The agronomy and economy of turmeric and ginger - The invaluable medicinal spice crops*. Elsevier insights, Pag. 355.

Puppo, L., García, M. 2009. *Determinación del consumo de agua del duraznero por lisimetría*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.14, n.1, p.25-31. UAEA/UFCG, Campina Grande, PB, Brasil.

Ravindran, P., Nirmal Babu, K., Sivaraman, K. 2007. *Turmeric – The Genus Curcuma*. Medicinal and Aromatic Plants – Industrial profiles. V. 45, Pág. 1-2, 37-38.

Rodríguez, E. 2012. *Uso de lisímetros de drenaje artesanales para determinar el kc de los principales estados fenológicos de la uva de mesa cv. thompson seedless en el valle de aconcagua*. Corporación universidad de Aconcagua, San Felipe, Chile.

Rodríguez, L. 2007. *Probabilidad y estadística básica para ingenieros*. Instituto de ciencias matemáticas, Escuela superior politécnica del litoral, Guayaquil, Ecuador.

Ruiz, M. 1997. *Utilización del modelo SWACROP en la simulación del uso del agua y el rendimiento de la papa (Solanum tuberosum L.c.v. Desiree) en suelos Ferralíticos Rojos*. Tesis doctoral, UNAH, Cuba. 88 p.

Ruiz M., Medina, H., Herrera, J. 2006. *Métodos empleados en Cuba para determinar las propiedades hidráulicas de suelos*. TERRA Latinoamericana 24(3):311-318.

Soto, G., Cover, P., Quintanilla, E., Pazos, L. 2004. *Efecto de la fertilización fraccionada sobre el rendimiento de Curcuma Longa (Zingiberaceae) en Guatuso, Alajuela*. Revista Agronomía costarricense 28(2):107-111, Costa Rica.

Turgut K., Sabit, E. 2008. *Calibration of van Genuchten Unsaturated Hydraulic Conductivity Parameters by Regression Technique*. In International Meeting on Soil Fertility Land Management and Agroclimatology. Turkey, 175-181 p.

USDA (Departamento de agricultura de los estados unidos), 1999. *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo*. Servicio de Conservación de Recursos Naturales, Instituto de Calidad de Suelos, Estados Unidos.

Van Genuchten, M. 1980. *A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil*. Soil Sci. Soc. Am. J. 44: 892-898.

Van Genuchten M., Simunet, J., Leij, F. and Sejna, M. 2000. *RETIC version 6. Code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils*. US Salinity Laboratory, USDA, ARS, USA. 68 p.

Wagner, M., Haddad, O., Ovalles, F, Medina, G., Mujica, M. 1991. *Evaluación de un modelo de riego comparando dos tensiones de humedad a capacidad de campo, en un suelo mollisol, sembrado con cambur (Giant cavendish)*. Revista Agronomía Tropical 41(1-2): 69-94. Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Maracay, Venezuela.

10 ANEXOS

10.1 ANEXO A

TABLAS DE RIEGO USADAS DURANTE LA INVESTIGACIÓN

10.1.1 1RA ETAPA

- LISIMETRO 1

Tabla 17. Tabla de riego para el lisímetro 1 en la 1ra etapa de la investigación.

Tensión (cb)	Cantidad a regar (mL)	Tensión (cb)	Cantidad a regar (mL)	Tensión (cb)	Cantidad a regar (mL)
100	410	77	320	54	200
99	400	76	320	53	190
98	400	75	310	52	180
97	400	74	310	51	170
96	400	73	300	50	170
95	390	72	300	49	160
94	390	71	290	48	150
93	380	70	290	47	140
92	380	69	280	46	140
91	380	68	280	45	130
90	370	67	270	44	120
89	370	66	270	43	110
88	370	65	260	42	100
87	360	64	260	41	90
86	360	63	250	40	80
85	350	62	250	39	70
84	350	61	240	38	60
83	350	60	230	37	50
82	340	59	230	36	40
81	340	58	220	35	30
80	330	57	220	34	20
79	330	56	210	33	0
78	330	55	200	32	0

- **LISIMETRO 2**

Tabla 18. Tabla de riego para el lisímetro 2 en la 1ra etapa de la investigación.

Tensión (cb)	Cantidad a regar (mL)	Tensión (cb)	Cantidad a regar (mL)	Tensión (cb)	Cantidad a regar (mL)
100	420	77	330	54	210
99	420	76	330	53	200
98	410	75	330	52	190
97	410	74	320	51	180
96	410	73	320	50	170
95	400	72	310	49	170
94	400	71	310	48	160
93	400	70	300	47	150
92	390	69	300	46	140
91	390	68	290	45	130
90	390	67	280	44	120
89	380	66	280	43	110
88	380	65	270	42	100
87	380	64	270	41	100
86	370	63	260	40	90
85	370	62	260	39	80
84	360	61	250	38	60
83	360	60	250	37	50
82	360	59	240	36	40
81	350	58	230	35	30
80	350	57	230	34	20
79	340	56	220	33	0
78	340	55	210	32	0

- **LISIMETRO 3**

Tabla 19. Tabla de riego para el lisímetro 3 en la 1ra etapa de la investigación.

Tensión (cb)	Cantidad a regar (mL)	Tensión (cb)	Cantidad a regar (mL)	Tensión (cb)	Cantidad a regar (mL)
100	420	77	330	54	200

99	410	76	320	53	190
98	410	75	320	52	190
97	410	74	320	51	180
96	400	73	310	50	170
95	400	72	310	49	160
94	400	71	300	48	160
93	390	70	300	47	150
92	390	69	290	46	140
91	380	68	290	45	130
90	380	67	280	44	120
89	380	66	270	43	110
88	370	65	270	42	100
87	370	64	260	41	90
86	370	63	260	40	80
85	360	62	250	39	70
84	360	61	250	38	60
83	350	60	240	37	50
82	350	59	230	36	40
81	350	58	230	35	30
80	340	57	220	34	20
79	340	56	210	33	0
78	330	55	210	32	0

10.1.2 2DA ETAPA

- LISIMETRO 1**

Tabla 20. Tabla de riego para el lisímetro 1 en la 2da etapa de la investigación.

Tensión (cb)	Cantidad a regar (mL)
100	820
99	820
98	810
97	810
96	810
95	810

Tensión (cb)	Cantidad a regar (lt)
70	710
69	700
68	690
67	690
66	680
65	680

Tensión (cb)	Cantidad a regar (lt)
40	490
39	480
38	470
37	460
36	450
35	440

94	800
93	800
92	790
91	790
90	790
89	780
88	780
87	780
86	770
85	770
84	770
83	760
82	760
81	750
80	740
79	740
78	740
77	740
76	730
75	730
74	720
73	720
72	710
71	710

64	670
63	670
62	660
61	650
60	650
59	640
58	640
57	630
56	620
55	620
54	610
53	600
52	600
51	590
50	580
49	570
48	570
47	560
46	550
45	540
44	530
43	520
42	510
41	500

34	430
33	420
32	400
31	390
30	380
29	360
28	340
27	330
26	310
25	300
24	280
23	260
22	240
21	210
20	190
19	160
18	140
17	120
16	90
15	70
14	30
13	0

- LISIMETRO 2**

Tabla 21. Tabla de riego para el lisímetro 2 en la 2da etapa de la investigación

Tensión (cb)	Cantidad a regar (mL)
100	860
99	860
98	850
97	850
96	850
95	840
94	840
93	840
92	830
91	830

Tensión (cb)	Cantidad a regar (mL)
70	740
69	730
68	730
67	720
66	720
65	710
64	710
63	700
62	700
61	690

Tensión (cb)	Cantidad a regar (mL)
40	520
39	510
38	500
37	490
36	480
35	470
34	450
33	440
32	430
31	410

90	830
89	820
88	820
87	810
86	810
85	810
84	800
83	800
82	790
81	790
80	790
79	780
78	780
77	770
76	770
75	760
74	760
73	750
72	750
71	740

60	680
59	680
58	670
57	660
56	660
55	650
54	640
53	640
52	630
51	620
50	610
49	600
48	600
47	590
46	580
45	570
44	560
43	550
42	540
41	530

30	400
29	380
28	370
27	350
26	330
25	320
24	290
23	270
22	250
21	230
20	210
19	180
18	160
17	130
16	100
15	70
14	40
13	0

- **LISIMETRO 3**

Tabla 22. Tabla de riego para el lisímetro 3 en la 2da etapa de la investigación

Tensión (cb)	Cantidad a regar (mL)
100	840
99	840
98	830
97	830
96	830
95	830
94	820
93	820
92	810
91	810
90	810
89	800
88	800

Tensión (cb)	Cantidad a regar (mL)
70	720
69	720
68	710
67	710
66	700
65	700
64	690
63	680
62	680
61	670
60	670
59	660
58	650

Tensión (cb)	Cantidad a regar (mL)
40	510
39	500
38	490
37	480
36	470
35	450
34	440
33	430
32	420
31	400
30	390
29	370
28	350

87	800
86	790
85	790
84	780
83	780
82	780
81	770
80	770
79	760
78	760
77	750
76	750
75	740
74	740
73	740
72	730
71	730

57	650
56	640
55	630
54	630
53	620
52	610
51	610
50	600
49	590
48	580
47	570
46	560
45	560
44	550
43	540
42	530
41	520

27	340
26	320
25	310
24	290
23	270
22	240
21	220
20	200
19	180
18	160
17	130
16	100
15	60
14	30
13	0

10.1.3 3RA ETAPA

- LISIMETRO 1**

Tabla 23. Tabla de riego para el lisímetro 1 en la 3ra etapa de la investigación

Tensión (cb)	Cantidad a regar (mL)
100	1410
99	1400
98	1390
97	1390
96	1390
95	1380
94	1370
93	1360
92	1350
91	1350
90	1340
89	1330
88	1330

Tensión (cb)	Cantidad a regar (mL)
72	1190
71	1180
70	1180
69	1160
68	1150
67	1140
66	1130
65	1120
64	1110
63	1100
62	1090
61	1070
60	1060

Tensión (cb)	Cantidad a regar (mL)
44	830
43	810
42	790
41	780
40	760
39	740
38	710
37	690
36	670
35	650
34	620
33	600
32	570

87	1320	59	1050	31	550
86	1310	58	1040	30	520
85	1300	57	1030	29	490
84	1290	56	1010	28	450
83	1290	55	1000	27	420
82	1280	54	990	26	390
81	1270	53	970	25	360
80	1260	52	960	24	330
79	1250	51	940	23	280
78	1250	50	930	22	240
77	1240	49	910	21	190
76	1230	48	900	20	140
75	1220	47	880	19	100
74	1210	46	870	18	50
73	1200	45	850	17	0

- LISIMETRO 2**

Tabla 24. Tabla de riego para el lisímetro 2 en la 3ra etapa de la investigación

Tensión (cb)	Cantidad a regar (mL)	Tensión (cb)	Cantidad a regar (mL)	Tensión (cb)	Cantidad a regar (mL)
100	1520	72	1300	44	920
99	1510	71	1290	43	900
98	1500	70	1280	42	880
97	1500	69	1270	41	860
96	1490	68	1250	40	840
95	1480	67	1240	39	820
94	1480	66	1230	38	800
93	1470	65	1220	37	780
92	1460	64	1210	36	760
91	1460	63	1200	35	730
90	1450	62	1190	34	710
89	1440	61	1180	33	680
88	1430	60	1160	32	650
87	1420	59	1150	31	620
86	1420	58	1140	30	590
85	1410	57	1120	29	560

84	1400	56	1110	28	530
83	1390	55	1100	27	500
82	1380	54	1080	26	470
81	1380	53	1070	25	430
80	1370	52	1060	24	390
79	1360	51	1040	23	350
78	1350	50	1020	22	310
77	1340	49	1010	21	270
76	1330	48	990	20	220
75	1320	47	970	19	170
74	1310	46	960	18	110
73	1310	45	940	17	55
				16	0

- LISIMETRO 3**

Tabla 25. Tabla de riego para el lisímetro 3 en la 3ra etapa de la investigación

Tensión (cb)	Cantidad a regar (mL)	Tensión (cb)	Cantidad a regar (mL)	Tensión (cb)	Cantidad a regar (mL)
100	2260	69	2010	38	1550
99	2250	68	2000	37	1530
98	2240	67	1980	36	1510
97	2240	66	1970	35	1480
96	2230	65	1960	34	1460
95	2220	64	1950	33	1430
94	2220	63	1940	32	1410
93	2210	62	1930	31	1380
92	2200	61	1920	30	1350
91	2190	60	1910	29	1320
90	2190	59	1890	28	1280
89	2180	58	1880	27	1250
88	2170	57	1870	26	1220
87	2160	56	1850	25	1190
86	2160	55	1840	24	1150
85	2150	54	1830	23	1110
84	2140	53	1820	22	1100
83	2130	52	1800	21	1000
82	2120	51	1780	20	980

81	2120	50	1770	19	930
80	2110	49	1750	18	890
79	2100	48	1740	17	830
78	2090	47	1720	16	760
77	2080	46	1700	15	700
76	2070	45	1670	14	640
75	2060	44	1670	13	580
74	2060	43	1650	12	500
73	2050	42	1630	11	410
72	2030	41	1610	10	320
71	2030	40	1590	9	230
70	2020	39	1570	8	110
				7	0

10.2 ANEXO B

TABLAS QUE DESCRIBEN LA CURVA DE RETENCIÓN DE HUMEDAD

Tabla 26. Valores de la curva de retención de humedad para el lisímetro 1 en diferentes unidades de tensión.

Tensión (atm)	Tensión (cb)	Humedad Vol	Tensión (atm)	Tensión (cb)	Humedad Vol	Tensión (atm)	Tensión (cb)	Hume dad Vol
14,481	1496	0,188	0,488	50,430	0,331	0,076	7,815	0,475
11,887	1228	0,193	0,453	46,820	0,336	0,071	7,334	0,480
9,874	1020	0,198	0,421	43,520	0,341	0,067	6,878	0,485
8,279	855,300	0,203	0,392	40,510	0,346	0,062	6,443	0,490
7,006	723,800	0,208	0,365	37,750	0,351	0,058	6,029	0,495
5,977	617,500	0,213	0,341	35,220	0,356	0,055	5,634	0,499
5,137	530,700	0,218	0,318	32,880	0,361	0,051	5,256	0,504
4,445	459,200	0,223	0,298	30,740	0,366	0,047	4,894	0,509
3,869	399,700	0,227	0,278	28,760	0,371	0,044	4,548	0,514
3,387	349,900	0,232	0,261	26,930	0,376	0,041	4,215	0,519
2,980	307,900	0,237	0,244	25,230	0,381	0,038	3,895	0,524
2,635	272,200	0,242	0,229	23,660	0,386	0,035	3,587	0,529
2,340	241,700	0,247	0,215	22,200	0,391	0,032	3,29	0,534
2,086	215,500	0,252	0,202	20,840	0,396	0,029	3,003	0,539
1,867	192,900	0,257	0,190	19,580	0,401	0,026	2,725	0,544
1,678	173,300	0,262	0,178	18,400	0,406	0,024	2,455	0,549

1,512	156,200	0,267	0,167	17,300	0,410	0,021	2,191	0,554
1,367	141,200	0,272	0,157	16,270	0,415	0,019	1,933	0,559
1,239	128,000	0,277	0,148	15,310	0,420	0,016	1,679	0,564
1,126	116,300	0,282	0,139	14,400	0,425	0,014	1,428	0,569
1,026	106	0,287	0,131	13,560	0,430	0,011	1,178	0,574
0,938	96,850	0,292	0,124	12,760	0,435	0,009	0,9252	0,579
0,858	88,670	0,297	0,116	12,010	0,440	0,006	0,6642	0,584
0,788	81,360	0,302	0,109	11,300	0,445	0,004	0,3828	0,589
0,724	74,800	0,307	0,103	10,640	0,450	0,002	0,223	0,591
0,667	68,900	0,312	0,097	10,010	0,455	0,001	0,1306	0,592
0,615	63,570	0,316	0,091	9,416	0,460	0,001	0,06459	0,593
0,569	58,760	0,321	0,086	8,853	0,465	0,000	0,01108	0,593
0,527	54,400	0,326	0,081	8,320	0,470	0,000	0,0019	0,593

Tabla 27. Valores de la curva de retención de humedad para el lisímetro 2 en diferentes unidades de tensión

Tensión (atm)	Tensión (cb)	Humedad Vol	Tensión (atm)	Tensión (cb)	Humedad Vol	Tensión (atm)	Tensión (cb)	Humedad Vol
12,903	1333	0,174	0,446	46,050	0,319	0,075	7,754	0,465
10,561	1091	0,179	0,416	43,000	0,324	0,071	7,306	0,470
8,748	903,700	0,183	0,389	40,200	0,329	0,067	6,879	0,475
7,332	757,400	0,188	0,364	37,630	0,334	0,063	6,470	0,480
6,207	641,200	0,193	0,341	35,260	0,339	0,059	6,078	0,485
5,302	547,700	0,198	0,320	33,070	0,344	0,055	5,701	0,489
4,565	471,600	0,203	0,300	31,040	0,349	0,052	5,340	0,494
3,960	409,100	0,208	0,282	29,170	0,353	0,048	4,992	0,499
3,458	357,200	0,213	0,266	27,430	0,358	0,045	4,656	0,504
3,037	313,700	0,217	0,250	25,810	0,363	0,042	4,333	0,509
2,681	277,000	0,222	0,235	24,310	0,368	0,039	4,020	0,514
2,380	245,900	0,227	0,222	22,910	0,373	0,036	3,717	0,519
2,122	219,200	0,232	0,209	21,600	0,378	0,033	3,423	0,523
1,900	196,300	0,237	0,197	20,380	0,383	0,030	3,138	0,528
1,708	176,400	0,242	0,186	19,230	0,387	0,028	2,859	0,533
1,541	159,200	0,247	0,176	18,160	0,392	0,025	2,587	0,538
1,395	144,100	0,251	0,166	17,150	0,397	0,022	2,320	0,543

1,266	130,800	0,256	0,157	16,210	0,402	0,020	2,057	0,548
1,154	119,200	0,261	0,148	15,320	0,407	0,017	1,796	0,553
1,053	108,800	0,266	0,140	14,480	0,412	0,015	1,537	0,557
0,964	99,630	0,271	0,133	13,690	0,417	0,012	1,276	0,562
0,885	91,440	0,276	0,125	12,940	0,421	0,010	1,010	0,567
0,814	84,110	0,281	0,118	12,240	0,426	0,007	0,733	0,572
0,750	77,530	0,285	0,112	11,570	0,431	0,004	0,429	0,577
0,693	71,600	0,290	0,106	10,940	0,436	0,002	0,254	0,579
0,641	66,260	0,295	0,100	10,340	0,441	0,001	0,151	0,581
0,595	61,420	0,300	0,095	9,769	0,446	0,001	0,076	0,581
0,552	57,020	0,305	0,089	9,228	0,451	0,000	0,014	0,582
0,513	53,030	0,310	0,084	8,713	0,455	0,000	0,002	0,582
0,478	49,380	0,315	0,080	8,222	0,460			

Tabla 28. Valores de la curva de retención de humedad para el lisímetro 3 en diferentes unidades de tensión

Tensión (atm)	Tensión (cb)	Humedad Vol	Tensión (atm)	Tensión (cb)	Humedad Vol	Tensión (atm)	Tensión (cb)	Humedad Vol
13,833	1429	0,180	0,456	47,150	0,326	0,076	7,898	0,468
11,335	1171	0,185	0,425	43,930	0,331	0,072	7,428	0,473
9,410	972,100	0,190	0,397	40,990	0,336	0,068	6,980	0,478
7,891	815,200	0,194	0,371	38,280	0,341	0,063	6,552	0,482
6,681	690,200	0,199	0,346	35,790	0,346	0,059	6,143	0,487
5,704	589,300	0,204	0,324	33,490	0,351	0,056	5,751	0,492
4,909	507,100	0,209	0,304	31,380	0,356	0,052	5,376	0,497
4,252	439,300	0,214	0,285	29,420	0,360	0,049	5,016	0,502
3,707	383,000	0,219	0,267	27,610	0,365	0,045	4,670	0,507
3,252	335,900	0,224	0,251	25,930	0,370	0,042	4,337	0,512
2,866	296,100	0,229	0,236	24,370	0,375	0,039	4,016	0,517
2,540	262,400	0,233	0,222	22,910	0,380	0,036	3,707	0,521
2,260	233,500	0,238	0,209	21,560	0,385	0,033	3,407	0,526
2,019	208,600	0,243	0,197	20,300	0,390	0,030	3,116	0,531
1,811	187,100	0,248	0,185	19,120	0,395	0,027	2,833	0,536
1,631	168,500	0,253	0,174	18,010	0,399	0,025	2,558	0,541
1,473	152,200	0,258	0,164	16,980	0,404	0,022	2,288	0,546
1,335	137,900	0,263	0,155	16,010	0,409	0,020	2,024	0,551

1,213	125,300	0,268	0,146	15,100	0,414	0,017	1,763	0,556
1,105	114,200	0,273	0,138	14,240	0,419	0,015	1,504	0,561
1,010	104,300	0,277	0,130	13,430	0,424	0,012	1,245	0,565
0,925	95,510	0,282	0,123	12,670	0,429	0,009	0,981	0,570
0,849	87,660	0,287	0,116	11,960	0,434	0,007	0,708	0,575
0,780	80,620	0,292	0,109	11,280	0,439	0,004	0,411	0,580
0,719	74,290	0,297	0,103	10,640	0,443	0,002	0,241	0,583
0,664	68,590	0,302	0,097	10,030	0,448	0,001	0,142	0,584
0,614	63,440	0,307	0,092	9,456	0,453	0,001	0,071	0,584
0,569	58,770	0,312	0,086	8,910	0,458	0,000	0,012	0,585
0,528	54,530	0,316	0,081	8,392	0,463	0,000	0,002	0,585
0,490	50,670	0,321						

10.3 ANEXO C

VOLUMENES DE RIEGO APLICADOS DURANTE EL DESARROLLO DE LA CÚRCUMA EN LOS LISÍMETROS

Tabla 29. Volúmenes de riego aplicados en cada lisímetro.

Fecha	Volumen Aplicado (mL)			Fecha	Volumen Aplicado (mL)		
	L1	L2	L3		L1	L2	L3
21-oct	210	40	120	29-dic	600	700	600
23-oct	0	220	250	04-ene	600	500	720
25-oct	0	0	0	06-ene	430	510	620
27-oct	40	250	160	08-ene	560	470	520
29-oct	20	0	0	10-ene	500	610	470
31-oct	40	230	140	12-ene	0	0	0
02-nov	40	140	120	13-ene	1130	1280	1200
04-nov	120	250	140	15-ene	1180	1280	2020
06-nov	0	40	130	17-ene	1190	1280	2020
08-nov	130	210	150	19-ene	760	1210	1930
10-nov	180	260	170	21-ene	1180	1220	1880
12-nov	0	220	140	23-ene	1190	1230	1850
14-nov	450	650	440	25-ene	900	1160	1770
16-nov	280	640	390	27-ene	0	1110	1460

18-nov	380	680	320	29-ene	900	390	0
20-nov	90	410	30	31-ene	780	1210	320
22-nov	330	600	350	02-feb	760	1200	890
24-nov	190	130	0	04-feb	450	1080	500
26-nov	300	500	420	06-feb	0	0	0
28-nov	240	570	480	08-feb	1180	1210	1880
30-nov	360	650	510	10-feb	1090	1230	1850
02-dic	400	670	400	12-feb	1000	1280	1770
04-dic	90	570	290	14-feb	570	1300	1460
06-dic	280	600	340	16-feb	870	1250	1280
08-dic	310	580	320	18-feb	900	1300	1410
10-dic	260	250	200	20-feb	50	1280	150
12-dic	520	640	390	26-feb	1090	1310	1510
14-dic	0	0	0	28-feb	0	1280	1350
16-dic	660	720	600	06-mar	760	1250	1410
18-dic	430	600	470	11-mar	2000	1230	1460
20-dic	340	660	530	19-mar	1400	2000	2000
22-dic	400	600	550	31-mar	0	3000	3000
23-dic	240	240	240	08-abr	1000	2000	2000
26-dic	430	710	560				

10.4 ANEXO D

EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO

Tabla 30. Evapotranspiración del cultivo diaria para cada uno de los lisímetros a lo largo de la investigación.

Fecha	ETc L1 (mm)	ETc L2 (mm)	ETc L3 (mm)	Fecha	ETc L1 (mm)	ETc L2 (mm)	ETc L3 (mm)	Fecha	ETc L1 (mm)	ETc L2 (mm)	ETc L3 (mm)
21-oct	1,31	0,25	0,75	16-dic	1,03	1,13	0,94	11-feb	3,13	4,00	5,53
22-oct	0,04	0,69	0,78	17-dic	1,34	1,88	1,47	12-feb	3,13	4,00	5,53
23-oct	0,04	0,69	0,78	18-dic	1,34	1,88	1,47	13-feb	1,78	4,06	4,56
24-oct	0,04	0,39	0,25	19-dic	1,06	2,06	1,66	14-feb	1,78	4,06	4,56
25-oct	0,04	0,39	0,25	20-dic	1,06	2,06	1,66	15-feb	2,72	3,91	4,00
26-oct	0,04	0,39	0,25	21-dic	1,25	1,88	1,72	16-feb	2,72	3,91	4,00
27-oct	0,04	0,39	0,25	22-dic	1,25	1,88	1,72	17-feb	2,81	4,06	4,41

28-oct	0,06	0,36	0,22	23-dic	0,75	0,75	0,75	18-feb	2,81	4,06	4,41
29-oct	0,06	0,36	0,22	24-dic	0,90	1,48	1,17	19-feb	0,16	4,00	0,47
30-oct	0,13	0,36	0,22	25-dic	0,90	1,48	1,17	20-feb	0,16	4,00	0,47
31-oct	0,13	0,36	0,22	26-dic	0,90	1,48	1,17	21-feb	1,14	1,36	1,57
01-nov	0,13	0,44	0,38	27-dic	1,25	1,46	1,25	22-feb	1,14	1,36	1,57
02-nov	0,13	0,44	0,38	28-dic	1,25	1,46	1,25	23-feb	1,14	1,36	1,57
03-nov	0,38	0,78	0,44	29-dic	1,25	1,46	1,25	24-feb	1,14	1,36	1,57
04-nov	0,38	0,78	0,44	30-dic	1,75	1,47	1,56	25-feb	1,14	1,36	1,57
05-nov	0,20	0,13	0,41	31-dic	1,75	1,47	1,56	26-feb	1,14	1,36	1,57
06-nov	0,20	0,13	0,41	01-ene	1,19	1,25	1,50	27-feb	4,31	4,00	4,22
07-nov	0,20	0,66	0,47	02-ene	1,19	1,25	1,50	28-feb	4,31	4,00	4,22
08-nov	0,20	0,66	0,47	03-ene	1,88	1,56	2,25	01-mar	0,79	1,30	1,47
09-nov	0,56	0,81	0,53	04-ene	1,88	1,56	2,25	02-mar	0,79	1,30	1,47
10-nov	0,56	0,81	0,53	05-ene	1,34	1,59	1,94	03-mar	0,79	1,30	1,47
11-nov	0,70	0,69	0,44	06-ene	1,34	1,59	1,94	04-mar	0,79	1,30	1,47
12-nov	0,70	0,69	0,44	07-ene	1,75	1,47	1,63	05-mar	0,79	1,30	1,47
13-nov	0,70	2,03	1,38	08-ene	1,75	1,47	1,63	06-mar	0,79	1,30	1,47
14-nov	0,70	2,03	1,38	09-ene	1,56	1,91	1,47	07-mar	3,13	1,91	2,28
15-nov	0,88	2,00	1,22	10-ene	1,56	1,91	1,47	08-mar	3,13	1,91	2,28
16-nov	0,88	2,00	1,22	11-ene	2,35	2,67	2,71	09-mar	4,17	2,56	3,04
17-nov	1,19	2,13	1,00	12-ene	2,35	2,67	2,71	10-mar	4,17	2,56	3,04
18-nov	1,19	2,13	1,00	13-ene	2,35	2,67	2,71	11-mar	4,17	2,56	3,04
19-nov	0,28	1,28	0,09	14-ene	3,69	4,00	6,31	12-mar	1,09	1,56	1,56
20-nov	0,28	1,28	0,09	15-ene	3,69	4,00	6,31	13-mar	1,09	1,56	1,56
21-nov	1,03	1,88	1,09	16-ene	3,72	4,00	6,31	14-mar	1,09	1,56	1,56

22-nov	1,03	1,88	1,09	17-ene	3,72	4,00	6,31	15-mar	1,09	1,56	1,56
23-nov	0,59	0,41	0,66	18-ene	2,38	3,78	6,03	16-mar	1,09	1,56	1,56
24-nov	0,59	0,41	0,66	19-ene	2,38	3,78	6,03	17-mar	1,09	1,56	1,56
25-nov	0,94	1,56	0,66	20-ene	3,69	3,81	5,88	18-mar	1,09	1,56	1,56
26-nov	0,94	1,56	0,66	21-ene	3,69	3,81	5,88	19-mar	1,09	1,56	1,56
27-nov	0,75	1,78	1,50	22-ene	3,72	3,84	5,78	20-mar	1,04	1,04	1,04
28-nov	0,75	1,78	1,50	23-ene	3,72	3,84	5,78	21-mar	1,04	1,04	1,04
29-nov	1,13	2,03	1,59	24-ene	2,81	3,63	5,53	22-mar	1,04	1,04	1,04
30-nov	1,13	2,03	1,59	25-ene	2,81	3,63	5,53	23-mar	1,04	1,04	1,04
01-dic	1,25	2,09	1,25	26-ene	1,41	3,47	4,56	24-mar	1,04	1,04	1,04
02-dic	1,25	2,09	1,25	27-ene	1,41	3,47	4,56	25-mar	1,04	1,04	1,04
03-dic	0,28	1,78	0,91	28-ene	1,41	1,22	0,50	26-mar	1,04	1,04	1,04
04-dic	0,28	1,78	0,91	29-ene	1,41	1,22	0,50	27-mar	1,04	1,04	1,04
05-dic	0,88	1,88	1,06	30-ene	2,44	3,78	0,50	28-mar	1,04	1,04	1,04
06-dic	0,88	1,88	1,06	31-ene	2,44	3,78	0,50	29-mar	1,04	1,04	1,04
07-dic	0,97	1,81	1,00	01-feb	2,38	3,75	2,78	30-mar	1,04	1,04	1,04
08-dic	0,97	1,81	1,00	02-feb	2,38	3,75	2,78	31-mar	1,04	1,04	1,04
09-dic	0,81	0,78	0,63	03-feb	1,41	3,38	1,56	01-abr	0,78	1,56	1,56
10-dic	0,81	0,78	0,63	04-feb	1,41	3,38	1,56	02-abr	0,78	1,56	1,56
11-dic	1,63	2,00	1,22	05-feb	1,84	1,89	2,94	03-abr	0,78	1,56	1,56
12-dic	1,63	2,00	1,22	06-feb	1,84	1,89	2,94	04-abr	0,78	1,56	1,56
13-dic	1,03	1,13	0,94	07-feb	1,84	1,89	2,94	05-abr	0,78	1,56	1,56
14-dic	1,03	1,13	0,94	08-feb	1,84	1,89	2,94	06-abr	0,78	1,56	1,56
15-dic	1,03	1,13	0,94	09-feb	3,41	3,84	5,78	07-abr	0,78	1,56	1,56
				10-feb	3,41	3,84	5,78	08-abr	0,78	1,56	1,56

Tabla 31. Evapotranspiración de referencia

Fecha	ETo(mm/día)	Fecha	ETo(mm/día)	Fecha	ETo(mm/día)
21-oct	4,01	17-dic	3,83	12-feb	3,97
22-oct	3,85	18-dic	3,89	13-feb	3,63
23-oct	4,41	19-dic	3,95	14-feb	3,63
24-oct	4,54	20-dic	1,75	15-feb	3,99
25-oct	4,71	21-dic	3,32	16-feb	3,96
26-oct	3,88	22-dic	3,33	17-feb	4,26
27-oct	4,6	23-dic	3,28	18-feb	3,81
28-oct	4,97	24-dic	4,09	19-feb	4,05
29-oct	4,47	25-dic	3,96	20-feb	4,03
30-oct	3,17	26-dic	4,15	21-feb	4,61
31-oct	3,7	27-dic	3,60	22-feb	4,2
01-nov	4,11	28-dic	4,02	23-feb	3,33
02-nov	4,18	29-dic	4,06	24-feb	3,98
03-nov	4,16	30-dic	4,13	25-feb	3,99
04-nov	3,51	31-dic	4,15	26-feb	4,08
05-nov	4,2	01-ene	4,17	27-feb	2,15
06-nov	3,86	02-ene	4,15	28-feb	3,83
07-nov	4,12	03-ene	4,11	01-mar	3,81
08-nov	3,68	04-ene	4,13	02-mar	3,96
09-nov	4,14	05-ene	4,15	03-mar	3,87
10-nov	3,88	06-ene	4,13	04-mar	3,49
11-nov	3,61	07-ene	4,12	05-mar	2,35
12-nov	3,56	08-ene	4,13	06-mar	3,87
13-nov	3,24	09-ene	4,17	07-mar	3,56
14-nov	3,59	10-ene	4,10	08-mar	2,44
15-nov	3,9	11-ene	4,13	09-mar	3,93
16-nov	3,66	12-ene	3,53	10-mar	3,94
17-nov	4,08	13-ene	3,55	11-mar	4,42
18-nov	3,72	14-ene	3,47	12-mar	4
19-nov	3,43	15-ene	3,44	13-mar	4,01
20-nov	3,97	16-ene	3,78	14-mar	3,85
21-nov	4,08	17-ene	3,76	15-mar	3,94
22-nov	3,94	18-ene	3,41	16-mar	3,45
23-nov	2,17	19-ene	3,86	17-mar	3,47
24-nov	4,1	20-ene	2,95	18-mar	3,45

25-nov	3,78	21-ene	3,81	19-mar	3,85
26-nov	3,46	22-ene	3,33	20-mar	3,79
27-nov	4,72	23-ene	3,51	21-mar	3,92
28-nov	4,16	24-ene	3,88	22-mar	4,03
29-nov	4,18	25-ene	3,97	23-mar	4,02
30-nov	3,73	26-ene	4,26	24-mar	4,03
01-dic	3,4	27-ene	2,65	25-mar	3,84
02-dic	3,95	28-ene	3,87	26-mar	3,82
03-dic	3,39	29-ene	4,01	27-mar	4,01
04-dic	3,39	30-ene	3,46	28-mar	3,9
05-dic	3,79	31-ene	3,41	29-mar	3,1
06-dic	3,76	01-feb	3,07	30-mar	1,81
07-dic	2,99	02-feb	3,05	31-mar	4,56
08-dic	3,84	03-feb	3,88	01-abr	3,56
09-dic	2,98	04-feb	3,96	02-abr	3,98
10-dic	3,38	05-feb	3,44	03-abr	3,59
11-dic	3,83	06-feb	3,47	04-abr	3,63
12-dic	3,48	07-feb	2,15	05-abr	4,1
13-dic	5,20	08-feb	2,88	06-abr	3,69
14-dic	3,39	09-feb	3,81	07-abr	3,51
15-dic	3,81	10-feb	3,52	08-abr	3,5
16-dic	3,41	11-feb	3,91		

10.5 ANEXO E

Tabla 32. Valores de Kc cálculos a partir de la relación ETc/ETo

Fecha	DDT	KcL1	KcL2	KcL3	Fecha	DDT	KcL1	KcL2	KcL3
25-oct-14	1	0,07	0,11	0,13	18-ene-15	85	0,96	1,11	1,75
30-oct-14	5	0,02	0,09	0,05	23-ene-15	90	0,98	1,09	1,68
04-nov-14	10	0,06	0,14	0,09	28-ene-15	95	0,53	0,83	1,11
09-nov-14	15	0,07	0,12	0,11	02-feb-15	100	0,65	0,96	0,42
14-nov-14	20	0,19	0,35	0,23	07-feb-15	105	0,49	0,74	0,71
19-nov-14	25	0,23	0,51	0,24	12-feb-15	110	0,82	0,97	1,41
24-nov-14	30	0,19	0,32	0,2	17-feb-15	115	0,61	1,03	1,11
29-nov-14	35	0,22	0,43	0,29	22-feb-15	120	0,26	0,71	0,41
04-dic-14	40	0,23	0,55	0,33	27-feb-15	125	0,51	0,54	0,6
09-dic-14	45	0,26	0,47	0,27	04-mar-15	130	0,39	0,49	0,53

14-dic-14	50	0,32	0,36	0,26	09-mar-15	135	0,74	0,56	0,65
19-dic-14	55	0,31	0,43	0,34	14-mar-15	140	0,57	0,49	0,53
24-dic-14	60	0,33	0,51	0,44	19-mar-15	145	0,3	0,43	0,43
29-dic-14	65	0,28	0,37	0,31	24-mar-15	150	0,26	0,26	0,26
03-ene-15	70	0,37	0,34	0,4	29-mar-15	155	0,28	0,28	0,28
08-ene-15	75	0,39	0,37	0,45	03-abr-15	160	0,25	0,39	0,39
13-ene-15	80	0,52	0,61	0,57	08-abr-15	165	0,21	0,42	0,42