

# Trabajo Fin de Máster

## OPTIMIZACIÓN DE LA ASIGNACIÓN DE AGUA DE RIEGO PARA LOS CULTIVOS DEL ÁREA DE INFLUENCIA DEL SISTEMA CARRIZAL-CHONE

Intensificación: *ORDENACIÓN, RESTAURACIÓN Y  
GESTIÓN DE CUENCAS*

**Autor:**

CRISTIAN SERGIO VALDIVIESO LÓPEZ

**Tutor:**

DR. ALBERTO GARCÍA PRATS

**SEPTIEMBRE, 2017**



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

mihma  
máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente





## Resumen del Trabajo de Fin de Máster

### Datos del proyecto

**Título del TFM en español:** OPTIMIZACIÓN DE LA ASIGNACIÓN DE AGUA DE RIEGO PARA LOS CULTIVOS DEL ÁREA DE INFLUENCIA DEL SISTEMA CARRIZAL-CHONE.

**Título del TFM en inglés:** OPTIMIZATION OF IRRIGATION WATER ALLOCATION FOR CROPS OF THE AREA OF INFLUENCE OF THE CARRIZAL-CHONE SYSTEM.

**Título del TFM en Valenciano:** OPTIMITZACIÓ DE L'ASSIGNACIÓ DE L'AIGUA DE REG PER ALS CULTIUS DE L'ÀREA D'INFLUÈNCIA DEL SISTEMA CARRIZAL-CHONE.

**Alumno:** Cristian Sergio Valdivieso López

**Tutor:** Dr. Alberto García Prats

**Fecha de Lectura:** SEPTIEMBRE, 2017

### Resumen

#### En español (máximo 5000 caracteres)

El recurso hídrico cada día es más escaso, y la agricultura al ser el mayor consumidor de agua, se ve obligada a mejorar la eficiencia de riego. Bajo esta premisa, se realizó este trabajo de optimización de la asignación de agua de riego, y se lo realizó para el área de influencia del sistema de riego Carrizal-Chone, el cual cuenta con una superficie de riego de 10.000,00 hectáreas.

Se determinaron las necesidades netas de riego para cada cultivo, bajo la metodología de la FAO 56 empleando el Kc dual, posteriormente se obtuvieron los costos de producción y se analizó el riesgo de la variabilidad de los precios de venta mediante el método de Monte Carlo, simulando 1 millón de veces para cada cultivo. Del resultado de precios se empleó el valor del percentil 80, 20 y el precio promedio, y cada precio fue un escenario de análisis en el modelo de optimización económico.

El escenario 1 se basó en el precio de venta del percentil 80, y al emplear el modelo de optimización, se obtuvo un margen-bruto de 38.320.354,48 US\$, mediante la asignación de 100,00 hm<sup>3</sup> de agua, con lo que se obtuvo una ratio de 0,38 US\$/m<sup>3</sup>, mientras que, para el

mismo escenario, pero sin emplear el modelo de optimización, se obtuvo un margen-bruto de 34.223.212,89 US\$ con una asignación de agua de 131,81 hm<sup>3</sup> y una ratio de 0,25 US\$/m<sup>3</sup>.

En el escenario 2, que empleó el precio promedio de venta, obtuvo como resultado al emplear el modelo de optimización un margen bruto de 25.441.544,80 US\$ y una ratio de 0,25 US\$/m<sup>3</sup>, mientras que, para el mismo escenario, pero sin emplear el modelo, se obtuvo un margen-bruto de 25.161.434,94 US\$ y una ratio de 0,19 US\$/m<sup>3</sup>.

Finalmente, para el escenario 3, se alcanzó un margen-bruto bajo el empleo del modelo de optimización de 12.698.807,45 US\$ y una ratio de 0,12 US\$/m<sup>3</sup>, mientras que sin el uso del modelo el margen-bruto para este escenario fue de 14.718.766,36 US\$ y una ratio de 0,11 US\$/m<sup>3</sup>.

### **En valenciano (máximo 5000 caracteres)**

El recurs hídric cada dia és més escàs, i l'agricultura al ser el major consumidor d'aigua es veu obligat a millorar l'eficiència de reg. Davall esta premissa, es va realitzar este treball d'optimització de l'assignació d'aigua de reg, i se'l va realitzar per a l'àrea d'influència del sistema de reg Carrizal-Chone, el qual compta amb una superfície de reg de 10.000,00 hectàrees.

Es van determinar les necessitats netes de reg per a cada cultiu, davall la metodologia de la FAO 56 usant el Kc dual, posteriorment es va obtindre els costos de producció i es va analitzar el risc de la variabilitat dels preus de venda per mitjà del mètode de Muntanya Carlo, simulant 1 milió de vegades per a cada cultiu. Del resultat de preus es va emprar el valor del percentil 80, 20 i el preu mitjana, i cada preu va ser un escenari d'anàlisi en el model d'optimització econòmic.

L'escenari 1 es va basar en el preu de venda del percentil 80, i a l'emprar el model d'optimització es va obtindre un marge-brut de 38.320.354,48 US\$ per mitjà de l'assignació de 100,00 hm<sup>3</sup> d'aigua, amb la qual cosa es va obtindre un ràtio de 0,38 US\$/m<sup>3</sup>, mentres que per al mateix escenari, però sense l'ocupació del model d'optimització, es va obtindre un marge-brut de 34.223.212,89 US\$ amb una assignació d'aigua de 131,81 hm<sup>3</sup> i un ràtio de 0,25 US\$/m<sup>3</sup>.

En l'escenari 2, que va emprar el preu mitjana de venda, va obtindre com resultat a l'emprar el model d'optimització un marge brut de 25.441.544,80 US\$ i un ràtio de 0,25 US\$/m<sup>3</sup>, mentres que per al mateix escenari, però sense emprar el model, es va obtindre un marge-brut de 25.161.434,94 US\$ i un ràtio de 0,19 US\$/m<sup>3</sup>.

Finalment, per a l'escenari 3, es va aconseguir un marge-brut davall l'ocupació del model d'optimització de 12.698.807,45 US\$ i un ràtio de 0,12 US\$/m<sup>3</sup>, mentres que sense l'ús del

model el marge-brut per a este escenari va ser de 14.718.766,36 US\$ i un ràtio de 0,11 US\$/m<sup>3</sup>.

**En inglés (máximo 5000 caracteres)**

Water resources are becoming scarcer every day, and agriculture as the largest consumer of water is forced to improve irrigation efficiency. Under this premise, this work of optimization of irrigation water allocation was carried out, and it was carried out for the area of influence of the irrigation system Carrizal-Chone, which has an irrigation surface of 10.000,00 hectares.

The net irrigation requirements for each crop were determined under FAO 56 methodology using the dual Kc, production costs were subsequently obtained and the risk of variability in sales prices was analyzed using the Monte Carlo method simulating 1 million times for each crop. From the price result, we used the value of the 80th percentile, 20 and the average price, and each price was a scenario of analysis in the economic optimization model.

Scenario 1 was based on the sale price of the 80th percentile, and when using the optimization model, a gross margin of 38.320.354,48 US\$ was obtained by allocating 100,00 hm<sup>3</sup> of water. Obtained a ratio of 0,38 US\$/m<sup>3</sup>, while for the same scenario, but without the use of the optimization model, a gross margin of 34.223.212,89 US\$ was obtained with a water allocation of 131,81 hm<sup>3</sup> and a ratio of US\$ 0,25/m<sup>3</sup>.

In scenario 2, which used the average selling price, it obtained as a result, using the optimization model, a gross margin of 25.441.544,80 US\$ and a ratio of 0,25 US\$/m<sup>3</sup>, while for the same scenario, but without using the model, a gross margin of 25.161.434,94 US\$ was obtained and a ratio of 0,19 US\$/m<sup>3</sup>.

Finally, for scenario 3, a gross margin was reached under the optimization model of 12.698.807,45 US\$ and a ratio of 0,12 US\$/m<sup>3</sup>, while without the use of the margin- Gross for this scenario was 14.718.766,36 US\$ and a ratio of 0,11 US\$/m<sup>3</sup>.

**Palabras clave español (máximo 5):** Optimización económica, asignación de agua, Kc dual, Monte Carlo.

**Palabras clave valenciano (máximo 5):** Optimització econòmica, assignació d'aigua, Kc dual, Monte Carlo.

**Palabras clave inglés (máximo 5):** Economic optimization, water allocation, dual Kc, Monte Carlo.

# ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos.....	3
1.2.1. Objetivo general.....	3
1.2.2. Objetivos específicos .....	3
1.3. Antecedentes.....	4
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO .....	6
2.1. Riego.....	6
2.1.1. Riego localizado goteo y microaspersión. ....	8
2.1.2. Aspersión .....	10
2.2. Eficiencia de riego .....	12
2.3. Evapotranspiración .....	12
2.4. Cálculo de las necesidades de agua de los cultivos .....	15
2.4.1. Método de Blaney-Criddle.....	15
2.4.2. Método de la radiación.....	16
2.4.3. Método de Penman .....	16
2.4.4. Método Penman-Monteith .....	16
2.5. Programación de riego.....	17
2.6. Necesidades de riego .....	18
2.7. Respuesta del rendimiento de los cultivos al riego.....	20
2.8. Modelos de optimización económica .....	21
2.8.1. MOPECO (Modelo de Optimización Económica del Riego).....	23
2.9. Análisis del riesgo de la variabilidad de precios .....	23
2.10. Cultivos .....	24
2.10.1. Cultivo de cacao .....	24

2.10.2.	Cultivo de plátano .....	25
2.10.3.	Cultivo de café .....	26
2.10.4.	Cultivo de naranja .....	26
2.10.5.	Cultivo de tomate .....	27
2.10.6.	Cultivo de pimiento .....	27
2.10.7.	Cultivo de maní .....	28
2.10.8.	Cultivo de arroz .....	28
2.10.9.	Cultivo de maíz .....	28
2.10.10.	Cultivo de yuca.....	29
2.10.11.	Cultivo de pasto.....	29
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS.....		30
3.1.	Lugar de estudio .....	30
3.2.	Datos meteorológicos .....	31
3.3.	Textura del suelo. ....	32
3.4.	Socioeconomía.....	32
3.5.	Sistema de riego Carrizal-Chone .....	33
3.6.	Metodología.....	34
3.6.1.	Estimación de la Evapotranspiración de referencia .....	34
3.6.2.	Estimación de la Evapotranspiración del cultivo mediante el Kc dual .....	42
3.6.3.	Estimación de la Evapotranspiración del cultivo ajustado bajo condiciones de estrés hídrico.....	48
3.6.4.	Programación del riego .....	50
3.6.5.	Análisis del riesgo de la variabilidad de precios.....	53
3.6.6.	Modelo optimización económica .....	54
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		59
4.1.	Presentación de los resultados .....	59
4.1.1.	Evapotranspiración de referencia ETo (mm día <sup>-1</sup> ).....	59

4.1.2. Evapotranspiración del cultivo ETc (mm día-1) y programación del riego en condiciones sin estrés hídrico.....	60
4.1.2. Análisis del riesgo de la variabilidad de los precios .....	73
4.1.3. Modelo de optimización económica .....	89
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES .....</b>	<b>105</b>
5.1. Conclusiones.....	105
5.2. Aportes del trabajo a la sociedad .....	107
<b>CAPÍTULO VI. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>108</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evapotranspiración de referencia y evapotranspiración del cultivo. ....	14
Figura 2. Balance de agua en la zona radicular.....	19
Figura 3. Área de influencia del sistema de riego Carrizal-Chone.. ....	30
Figura 4. Ubicación del área de influencia del sistema de riego Carrizal-Chone. ....	31
Figura 5. Construcción de la curva de Kcb según las fases del cultivo. ....	45
Figura 6. Coeficiente de estrés hídrico según el contenido de humedad en el suelo. ....	47
Figura 7. Evapotranspiración de referencia del área de influencia del sistema de riego Carrizal-Chone. . ....	59
Figura 8. Evapotranspiración del cultivo de cacao.....	60
Figura 9. Programación de riego para el cultivo de cacao.. ....	60
Figura 10. Evapotranspiración del cultivo de naranja.....	61
Figura 11. Programación de riego para el cultivo de naranja.....	61
Figura 12. Evapotranspiración del cultivo de café.....	62
Figura 13. Programación de riego para el cultivo de café.....	62
Figura 14. Evapotranspiración del cultivo de plátano.....	63
Figura 15. Programación de riego para el cultivo de plátano.....	63
Figura 16. Evapotranspiración del cultivo de pimiento.. ....	64
Figura 17. Programación de riego para el cultivo de pimiento en dos épocas de siembra. ....	65
Figura 18. Evapotranspiración del cultivo de maíz.....	65
Figura 19. Programación de riego para el cultivo de maíz en dos épocas de siembra. ....	66
Figura 20. Evapotranspiración del cultivo de tomate.....	67
Figura 21. Programación de riego para el cultivo de tomate en dos épocas de siembra.....	67
Figura 22. Evapotranspiración del cultivo de yuca.....	68
Figura 23. Programación de riego para el cultivo de yuca.....	68
Figura 24. Evapotranspiración del cultivo de maní.....	69
Figura 25. Programación de riego para el cultivo de maní en dos épocas de siembra.....	70
Figura 26. Evapotranspiración del cultivo de arroz.. ....	70
Figura 27. Programación de riego para el cultivo de arroz en dos épocas de siembra.....	71
Figura 28. Evapotranspiración del cultivo de pasto.. ....	72
Figura 29. Programación de riego para el cultivo de pasto.....	72

Figura 30. Histograma de distribución de los precios históricos del cultivo de cacao.....	73
Figura 31. Histograma de los precios simulados del cultivo de cacao.....	74
Figura 32. Histograma de distribución de los precios históricos del cultivo de café.....	74
Figura 33. Histograma de los precios simulados del cultivo de café. ....	75
Figura 34. Histograma de distribución de precios históricos del cultivo de plátano.....	76
Figura 35. Histograma de los precios simulados del cultivo de plátano. ....	77
Figura 36. Histograma de distribución de los precios históricos del cultivo de naranja.....	77
Figura 37. Histograma de los precios simulados del cultivo de naranja .....	78
Figura 38. Histograma de distribución de los precios históricos del cultivo de pimienta. ....	79
Figura 39. Histograma de los precios simulados del cultivo de pimienta.....	80
Figura 40. Histograma de distribución de los precios históricos del cultivo de tomate. ....	80
Figura 41. Histograma de los precios simulados del cultivo de tomate.....	81
Figura 42. Histograma de distribución de los precios históricos del cultivo de maíz.....	82
Figura 43. Histograma de los precios simulados del cultivo de maíz. ....	83
Figura 44. Histograma de distribución de los precios históricos del cultivo de arroz. ....	84
Figura 45. Histograma de los precios simulados del cultivo de arroz.....	85
Figura 46. Histograma de distribución de los precios históricos del cultivo de maní.....	85
Figura 47. Histograma de los precios simulados del cultivo de maní.....	86
Figura 48. Histograma de distribución de precios históricos del cultivo de yuca.....	87
Figura 49. Histograma de los precios simulados del cultivo de yuca. ....	88
Figura 50. Funciones agua rendimiento de los cultivos en el escenario 1. . ....	95
Figura 51. Funciones agua rendimiento de los cultivos en el escenario 2.. ....	96
Figura 52. Funciones agua rendimiento de los cultivos en el escenario 3.. ....	97

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas UTM del área de influencia del sistema de riego Carrizal-Chone. ....	31
Tabla 2. Datos mensuales promedio de variables climáticas. ....	32
Tabla 3. Fases, coeficiente basal y altura de cada cultivo. ....	43
Tabla 4. Precios históricos de los cultivos. ....	53
Tabla 5. Resumen estadístico para los precios de cacao históricos.....	73
Tabla 6. Resumen estadístico para los precios de cacao simulados. ....	73
Tabla 7. Resumen estadístico para los precios de café históricos. ....	75
Tabla 8. Resumen estadístico para los precios de café simulados. ....	75
Tabla 9. Resumen estadístico para los precios de plátano históricos. ....	76
Tabla 10. Resumen estadístico para los precios de plátano simulados. ....	76
Tabla 11. Resumen estadístico para los precios de naranja históricos. ....	78
Tabla 12. Resumen estadístico para los precios de naranja simulados. ....	78
Tabla 13. Resumen estadístico para los precios de pimiento históricos. ....	79
Tabla 14. Resumen estadístico para los precios de pimiento simulados.....	79
Tabla 15. Resumen estadístico para los precios de tomate históricos.....	81
Tabla 16. Resumen estadístico para los precios de tomate simulados. ....	81
Tabla 17. Resumen estadístico para los precios de maíz históricos. ....	82
Tabla 18. Resumen estadístico para los precios de maíz simulados. ....	83
Tabla 19. Resumen estadístico para los precios de arroz históricos. ....	84
Tabla 20. Resumen estadístico para los precios de arroz simulados.....	84
Tabla 21. Resumen estadístico para los precios de maní históricos.....	86
Tabla 22. Resumen estadístico para los precios de maní simulados. ....	86
Tabla 23. Resumen estadístico para los precios de la yuca históricos. ....	87
Tabla 24 . Resumen estadístico para los precios de la yuca simulados.....	88
Tabla 25. Necesidades totales de riego y fracción de reducción en la producción. ....	89
Tabla 26. Margen-bruto en función de la fracción del rendimiento esperado para el cultivo de cacao y naranja. ....	90
Tabla 27. Margen-bruto en función de la fracción del rendimiento esperado para el cultivo de café y plátano.....	91

Tabla 28. Margen-bruto en función de la fracción de rendimiento esperado para los cultivos de pimiento y tomate.....	92
Tabla 29. Margen-bruto en función de la fracción del rendimiento esperado para los cultivos de maíz y .....	93
Tabla 30. Margen-bruto en función de la fracción del rendimiento para los cultivos de maní y arroz.....	94
Tabla 31. Margen-bruto en función de la fracción del rendimiento esperado para el cultivo de pasto. ....	95
Tabla 32. Optimización de la asignación de agua y superficie de siembra de los cultivos bajo el escenario 1.....	99
Tabla 33. Asignación de agua y superficie de siembra de los cultivos bajo el escenario 1 sin modelo de optimización. ....	100
Tabla 34. Optimización de la asignación de agua y superficie de siembra de los cultivos bajo el escenario 2.....	101
Tabla 35. Asignación de agua y superficie de siembra de los cultivos bajo el escenario 2 sin modelo de optimización. ....	102
Tabla 36. Optimización de la asignación de agua y superficie de siembra de los cultivos bajo el escenario 3.....	103
Tabla 37. Asignación de agua y superficie de siembra de los cultivos bajo el escenario 3 sin modelo de optimización. ....	104

## **Agradecimientos**

*En primer lugar, quiero agradecer a Dios por darme todas las bendiciones que Él siempre me ha dado y la fuerza para conseguir las metas que me he propuesto.*

*Quiero agradecer de una manera muy especial a mi querida novia Rafaela, por ser un apoyo incondicional durante todo este proceso, quien siempre ha estado ahí para animarme y ayudarme a seguir adelante.*

*Así también quiero agradecer a mi familia, a mis padres Cristian y Patricia quienes han sido un pilar siempre en mi vida, un verdadero ejemplo de familia, de trabajo y de superación; a mis hermanos Isabel y José Nicolás, quienes a la distancia han hecho su parte; a mis tíos, Patricia, Juan Esteban y Fernando, quienes siempre han estado pendientes de mí y me han ayudado en muchas cosas a lo largo de mi vida; a mis abuelos Fernando y Mélida que sé que me tienen muy presentes en su vida. De manera muy especial quiero darle las gracias a mi tío Carlos, decirle que he aprovechado al máximo mi estancia y estudios.*

*Finalmente quiero darle las gracias a mi tutor, Alberto García Prats, quien desde un inicio tuvo la predisposición de ayudarme a realizar este trabajo y a lo largo del curso supo enseñarme mucho acerca del riego y ampliar los horizontes que tenía sobre este tema.*

# **CAPÍTULO I. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS**

## **1.1. Introducción**

El recurso hídrico es un elemento vital para la vida del ser humano y para los ecosistemas; además de ser fundamental, es el recurso que más abunda en la tierra. Históricamente, el ser humano ha empleado el agua para sus actividades cotidianas, viéndose beneficiado de diversas formas. El uso sabio y seguro del recurso hídrico contribuyó al bienestar sostenible del hombre, y de esta manera, tanto la tierra como el agua tienen contribuciones notables en el desarrollo socio económico de todas las regiones del mundo; la agricultura bajo riego a lo largo del río Nilo, la generación hidroeléctrica y otros ejemplos más, donde se aprecia la importancia del recurso hídrico (Adeboye, 2015).

Actualmente, uno de los mayores problemas, es la escasez del recurso hídrico en varios lugares del planeta, donde el riego es el principal consumidor del agua. Las extracciones mundiales para los 280 millones de hectáreas bajo riego son del orden de 2.300,00 Km<sup>3</sup> al año, y este valor representa el 70,00 % de las extracciones totales de agua. Además, la eficiencia del riego varía entre países, influenciado tanto por la tecnología como de políticas, lo que puede suponer un mayor o menor consumo de agua para un mismo cultivo. Un claro ejemplo de inversión respecto a la necesidad de usar eficientemente el recurso hídrico ha sido la millonaria inversión de Australia y España (Albiac, J. Dinar, 2009).

La agricultura a nivel mundial tiene dos objetivos básicos; primero, suplir la demanda mundial de alimentos a la población y segundo, generar una mejora en la socioeconomía del sector agrícola. Para lograr que la agricultura pueda ser competitiva en un mundo cada día más globalizado, se debe emprender un trabajo que revolucione el sector, principalmente empleando tecnologías que permitan una mayor equidad social, causen un menor impacto ambiental, logre mantener dentro de lo posible los recursos tanto genéticos, como de suelo y agua.

Dentro del recurso hídrico, el riego es un elemento primordial para alcanzar los objetivos básicos de la agricultura. Sin embargo, debido a la escasez del mismo, esto representa una gran

limitante para el desarrollo del sector agrícola, siendo más evidente esto en regiones áridas o semiáridas.

Sumado a estas limitaciones, la elevada demanda por agua, causada por un aumento de la población, ha repercutido en un incremento en las tarifas del agua y ha limitado aún más el agua necesaria para el sector agrícola (Pereira, De Juan, Picornell, & Tarjuelo, 2010).

La necesidad de agua de los cultivos puede ser suministrada por las precipitaciones, pero si las lluvias no son suficientes, o si tienen una variabilidad temporal que no coinciden con las épocas de mayor demanda de agua, se vuelve vital dotar el agua artificialmente mediante sistemas de riego.

Es conocido que el sector agrícola es el encargado de la alimentación y debido a esto, cada una de sus ramas de estudio, deben desarrollar tecnologías para lograr una mayor producción empleando menos recurso y a un menor costo. De esta manera, el riego es una de estas ramas dentro de la línea agrícola que necesita más estudios y mejoras tecnológicas (Cisneros, 2003).

El riego y el drenaje son dos elementos que ayudan a incrementar la producción agrícola, mejoran la calidad de los productos cosechados, permite un uso más sostenible del suelo, contribuye a lograr la seguridad alimentaria y por tal razón son considerados como fundamentales. La implementación de sistemas de riego en las últimas décadas ha tenido un crecimiento importante. En 1997, la superficie mundial bajo regadío era de 268 millones de hectáreas; en América Latina y el Caribe la superficie bajo regadío alcanza los 18 millones de hectáreas, lo que representa cerca del 7,00 % de la superficie mundial (FAO, 2000).

Para que un país logre alcanzar un desarrollo socioeconómico, dependerá principalmente de que se pueda alcanzar una producción agrícola acorde a los requerimientos alimenticios de su población y tener una sobre producción que se pueda exportar.

Para conseguir la producción agrícola deseada, es necesario incrementar las áreas de cultivo, dotándolas de sistemas de riego y potencializar las áreas actuales bajo siembra y regadío; de este modo se asegura una mayor eficiencia del uso del agua de riego y a su vez se logra una producción continua (Gurovich, 1985).

El USDA (1997), menciona que el riego es vital para producir una calidad y rendimiento aceptables de cultivo en tierras de cultivo áridas; el riego suplementario es también vital para producir la calidad y el rendimiento en las zonas de cultivo de lugares semiáridos y subhúmedos durante la estación seca o de sequías.

La utilización inteligente del agua de riego por el usuario es una actividad necesaria en nuestra existencia como sociedad. La competencia por un suministro de agua cada vez más limitado para otros usos por parte de la sociedad, requieren que el usuario de riego controle mucho más su uso y se use de manera más eficiente. La importancia de los cultivos de regadío es extremadamente vital para la subsistencia.

El manejo del agua de riego en la actualidad requiere que se use la mejor información y técnicas que actualmente la tecnología puede ofrecer en la planificación, diseño, evaluación y manejo de los sistemas de riego.

El riego adecuadamente administrado puede aumentar el rendimiento de los cultivos, reducir los riesgos comúnmente asociados con la agricultura, aumentar la calidad del producto, reducir las presiones de plagas y controlar los nutrientes. Debido a que la gestión del riego es específica para cada cultivo, la investigación del riego debe ser específica del cultivo, lo que significa que los sistemas de cultivo deben ser entendidos, incluyendo aquellos que involucran cultivos especiales de alto valor con necesidades particulares (USDA, 2001).

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

- Establecer la asignación óptima de agua de riego y la superficie de siembra que maximice el margen bruto de los principales cultivos del área de influencia del sistema de riego Carrizal-Chone mediante un modelo de optimización económica.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Estimar las necesidades totales de riego, mediante un balance diario de los principales cultivos del área de influencia del sistema de riego Carrizal-Chone.

- Determinar los costos de producción para cada uno de los cultivos, analizando el riesgo de la variabilidad de los precios de venta empleando la simulación de Monte Carlo.
- Emplear un modelo hidro-económico, que asigne el agua y la superficie de siembra de los cultivos de manera que optimice el uso de agua maximizando el margen-bruto.

### **1.3. Antecedentes**

Según el MAGAP (2012), el Ecuador, en el Tercer censo Nacional Agropecuario, tiene una superficie para la agricultura de 12.355.831,00 hectáreas dividida en 842.882,00 unidades de producción agropecuarias (UPAs). De toda esta superficie, solo se riegan 850.000,00 hectáreas, lo que corresponde a casi el 7,00 %.

El riego por gravedad es el más importante, con una superficie de 432.147,00 hectáreas, seguido del riego por bombeo con 220.842,00 hectáreas; el riego presurizado se divide en riego por aspersión con una superficie de 170.058,00 hectáreas y el riego por goteo con 19.401,00 hectáreas; y se contempla otro grupo con una superficie de 10.885,00 hectáreas.

Manabí es la mayor provincia agrícola del Ecuador (El Comercio, 2011); Manabí tiene una superficie dedicada a la agricultura de 1.583.661,00 hectáreas dividida en 74.676,00 UPAs, de las cuales 209.148,00 ha a cultivos permanentes, 114.200,00 ha a cultivos transitorios, 52.481,00 ha a descanso, 836.000,00 ha a pastos cultivados y naturales, 340.632,00 ha a montes y bosques y 31.235,00 ha a otros usos.

Sin embargo, del millón y medio de hectáreas de suelo agrícola, Manabí únicamente tiene casi 16.000,00 hectáreas bajo riego, es decir poco más del 1,00 %; el riego por goteo tiene una superficie de 219,00 ha, la aspersión 336,00 ha, el bombeo 10.527,00 ha, riegos a gravedad 3.469,00 ha y otros sistemas 339,00 ha (MAGAP, 2012).

De los 22 cantones que tiene la provincia de Manabí, el sistema de riego más importante de la provincia es, el Carrizal-Chone y tiene un área de influencia de poco más de 10.000,00 hectáreas, que abarca principalmente los cantones Bolívar, Junín, Tosagua y Chone. El objetivo de este sistema de riego es que la agricultura del sector tenga un importante avance tecnológico, al pasar de agricultura de secano o de riego por inundación a un sistema de riego presurizado

principalmente adoptando el riego por goteo. Los cultivos más importantes del área son: cacao, plátano, arroz, tomate, yuca, maní, pastizales, cítricos, café, pimiento y maíz. El riego de estos cultivos en algunos casos se lo realiza sin un criterio de eficiencia, por lo tanto, en ciertos casos se pudiera estar desperdiciando agua, o en algunos casos quizá el no regar adecuadamente estaría siendo una limitante para lograr una mayor producción.

## **CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Riego**

La historia y los descubrimientos arqueológicos han revelado que los métodos de riego realizados en aquel entonces han jugado un rol fundamental en el progreso y establecimiento de las civilizaciones. Las primeras civilizaciones se fundaron en lugares estratégicos donde el agua era accesible fácilmente, como por ejemplo el caso de los ríos Nilo, Tigris, Éufrates y Amarillo, donde importantes ríos circulaban a por las civilizaciones que ahí habitaban. El método de riego por gravedad tiene sus orígenes aproximadamente por los años 6.000 A.C. en las proximidades del río Nilo y aún hasta la actualidad sigue siendo el método más dominante mundialmente.

En lo referente a avances tecnológicos no se logró nada relevante que revolucione los sistemas de riego hasta finales del siglo XX en donde aparecieron los sistemas de riego presurizados los cuales sí tuvieron un impacto muy importante y fundamental para el sector agrícola (Tostado, 2010).

El riego representó un salto cualitativo en la rentabilidad de la producción agrícola. El riego emplea dos materias primas, agua y energía, que actualmente son bienes escasos y muy preciados; por ende, el conocimiento de la técnica de riego apropiada según cada circunstancia, y el buen manejo de los sistemas de regadíos tiene el objetivo de conseguir una eficiencia óptima en el uso del agua y de la energía que son retos que siempre se han de tomar en consideración (Revilla, n.d.).

Según Vásquez, Vásquez, Vásquez, & Cañamero (2017), la práctica de riego de los cultivos tiene su origen desde hace más de 5.000 años. Las primeras civilizaciones habían observado que para que las plantas puedan crecer, había elementos fundamentales como el suelo, el agua, los nutrientes y el sol, siendo este una fuente de energía. A partir de esto, el uso del agua se fue introduciendo, difundiendo y evolucionando en todo el mundo hasta llegar a la actualidad, donde la tecnología ha logrado desarrollar sistemas de riego sofisticados y más eficientes. El 40,00 % de la producción total de alimentos a nivel mundial se obtiene de las áreas bajo riego, con lo que se puede apreciar claramente el potencial del riego en la agricultura.

El recurso hídrico cada día es más escaso, tanto en cantidad como en calidad, no sólo en las zonas áridas y semiáridas donde tradicionalmente han sido propensas, sino también en las regiones donde abundan las lluvias. Por tal razón, emplear eficientemente los ya restringidos recursos disponibles de agua dulce en la agricultura bajo regadío es una tarea fundamental si se pretende lograr un riego sostenible, por eso el uso de sistemas de riego presurizados es una estrategia clave para aumentar el rendimiento de los cultivos empleando eficientemente el agua (Yesim, Yazar, Sertan, & Ilker, 2017).

Según el INIA (2005), “*el riego es la aplicación de agua a los cultivos en forma artificial, oportuna y uniforme*”. El autor también establece que, regar no solo consiste en dotar de agua a los cultivos, sino que se lo debe hacer bajo ciertas consideraciones, que mejoren la eficiencia en cuanto al uso del agua como, por ejemplo, hacerlo de una manera oportuna, conocer los intervalos entre riegos y, que los tiempos de riego vayan según las necesidades de cada cultivo, el clima y el suelo.

Los avances tecnológicos e investigativos que se han realizado en el sector de riego, han permitido incrementar la eficiencia en el uso de agua, localizando de una manera óptima el agua en el cultivo y reduciendo las pérdidas, además de que a través de un sistema de riego presurizado conocido como fertirrigación, se puede incorporar fertilizantes y, de esta manera se logra disminuir costos en mano de obra y se es más eficiente al momento de aplicar agua y fertilizantes.

Para la producción agrícola bajo regadío, conocer la relación suelo-agua-planta es esencial, pues no necesariamente entre más agua se aplique se va a tener mejores resultados; el desarrollo del cultivo puede verse limitado tanto por exceso de agua como por escases. Hay áreas donde las precipitaciones son considerables, pero aun así los cultivos no tienen un desarrollo óptimo, esto puede deberse a una distribución de las precipitaciones muy variable en el tiempo y el espacio, suelos con baja retención de humedad, alta escorrentía entre otros procesos. Por tal razón, el riego no solo se limita a regiones áridas o semiáridas, sino que puede considerarse necesario en cualquier lugar.

Aparte, que cada cultivo tiene sus propias particularidades y cada suelo sus propiedades. La cantidad de agua disponible en el suelo en un tiempo determinado es el resultado de la cantidad recibida ya sea por lluvia o riego menos las pérdidas por transpiración del cultivo, evaporación del suelo, y/o infiltración profunda (Megh & Ramírez, 2007).

### **2.1.1. Riego localizado goteo y microaspersión.**

Históricamente, el recurso hídrico ha sido un elemento determinante en la producción agropecuaria; a nivel mundial, un gran porcentaje tiene problemas por las escasas precipitaciones causadas por la variabilidad de tiempo y espacio de las lluvias. Para atenuar este problema, se han ido desarrollando e implementando técnicas que tratan de ser cada vez más eficientes para lograr un mejor manejo y conservar el agua.

El sistema de riego localizado principalmente por goteo ha sido uno de los métodos que han tenido mayor éxito y ha sido más ampliamente aceptado y empleado a nivel mundial. Este método aporta agua exclusivamente en el suelo que es ocupado por el cultivo siendo este espacio el ocupado por las raíces (Fernández & García, 2014).

La Junta de Andalucía (2010), menciona que “*el riego localizado consiste en la aplicación de agua sobre la superficie del suelo o bajo éste*”. Para ello, se emplean tuberías presurizadas, accesorios y para que el agua salga hacia el suelo se emplean emisores, ya sean goteros o microaspersores según sea el caso; la finalidad del riego localizado es la de regar solo una porción del suelo siendo esta la más próxima a la planta; la zona humedecida por cada emisor se la denomina bulbo húmedo y la forma de este bulbo dependerá de la textura del suelo y del caudal emitido por el emisor.

El riego localizado, es un método que consiste en la aplicación tanto de agua como de fertilizante si es el caso, y se lo realiza en dosis bajas, pero con una alta frecuencia, con lo que los riegos realizados en cada campaña serán elevados, pero el volumen por riego será bajo; de esta manera se pretende que el contenido de humedad en el suelo se mantenga constante a capacidad de campo o siempre muy cercano a ese nivel.

El mismo autor comenta que el sistema de riego localizado más popular es el riego por goteo, el cual el agua que circula por las tuberías va a presión hasta que sale por los goteros, en los que han sido diseñados para que en su estructura interna en forma de laberinto el agua vaya perdiendo presión y velocidad logrando así que el agua salga gota a gota.

El goteo es normalmente empleado en cultivos de frutales y en cultivos hortícolas gracias a su gran adaptabilidad de marcos de plantación.

En el sistema de riego por microaspersión, el agua es aplicada al suelo en forma de lluvia muy fina, regando una zona delimitada por el alcance que tenga el emisor seleccionado.

Según Fuentes & García (1999), “*el riego localizado, consiste en aplicar el agua a una zona más o menos restringida del volumen de suelo que, habitualmente ocupan las raíces*”. Sus características principales son:

- No se riega por completo el suelo.
- Se utilizan dosis de riego bajas a una baja presión.
- La frecuencia de riego será alta.

Dentro de las características importantes del riego localizado, se tiene que se van a modificar ciertas condiciones en la relación suelo-agua-planta como, por ejemplo, una disminución de la evaporación, la forma de distribuirse las raíces será diferente en comparación a riegos por inundación, u otras formas de riego, donde se moja toda la superficie.

Otra característica es la alta frecuencia de riego, lo cual significará que el suelo siempre va a estar a capacidad de campo o muy cerca a eso, por lo que las plantas podrán absorber el agua con mucha facilidad sin perder mayormente energía

El riego localizado incluye:

- Riego por goteo: los goteros son los emisores que aplican el agua gota a gota. Esto se logra mediante un emisor que tiene un laberinto en su interior y el flujo de agua al pasar por dicho laberinto pierde presión, y de esta manera se logra que salga el agua en forma de gota. Por lo general el caudal será inferior a 16,00 litros por hora.
- Riego por microaspersión: consiste en un dispositivo que echa el agua en forma de lluvia fina. El emisor consta de una cabeza normalmente giratoria para distribuir el agua en forma de círculo. Los caudales de cada micro aspersor son por lo general entre los 16,00 y 200,00 litros por hora.

Siguiendo con el autor anterior, se describe a continuación las ventajas e inconvenientes del riego localizado.

Ventajas con respecto a los sistemas de riego tradicionales:

- Hay un mejor aprovechamiento del agua.
- Existe la posibilidad de utilizar aguas con mayor contenido de sales.
- Se logra una mayor uniformidad de riego.
- Se consigue un mejor aprovechamiento de los fertilizantes.
- Se alcanzan mayores cosechas.
- Existe menor aparición de malezas gracias a la menor superficie humedecida.
- Facilidad para la aplicación de agroquímicos junto con el agua de riego.
- Mayor facilidad para realizar las labores agrícolas al solo estar humedecida la porción del suelo cercana a los cultivos.
- Ahorro en la mano de obra.

Inconvenientes:

- Se necesita mano de obra más calificado para manejar los sistemas.
- Necesidad inicial del análisis químico y físico del agua.
- Existe la posibilidad de salinizar el bulbo húmedo si se realiza mal la aplicación del riego.
- Se necesita revisar con periodicidad el funcionamiento del cabezal de riego y la instalación en general.
- Elevado costo inicial.

### **2.1.2. Aspersión**

Los sistemas de riego por aspersión se realizan a través de sistemas presurizados, y tienen como finalidad distribuir el agua uniformemente para lograr un humedecimiento parejo en el suelo. En el riego por aspersión se aplica el agua en forma de lluvia, por lo que al momento de diseñar este tipo de riego se debe considerar un elemento fundamental, que es la intensidad o pluviometría que debe ser igual o menor a la velocidad de infiltración para evitar la formación de charcos o de escorrentía superficial del agua suministrada por el sistema y lograr así un perfil de humedecimiento uniforme en el suelo (Vásquez *et al.*, 2017).

Según Fuentes & García (1999), el riego por aspersión consiste en una técnica, en que se emite agua en forma de lluvia por medio de unos dispositivos de aspersión alimentados por agua a presión, estos aparatos también llamados boquillas serán los que asegurarán que el reparto del agua sobre la superficie del terreno se realice de una forma uniforme.

En riego por aspersión, el agua es aplicada en el punto de consumo mediante un sistema de boquillas. La aspersión puede clasificarse como conjuntos fijos, movimiento periódico o movimiento continuo; Estos sistemas de riego incluyen el conjunto de sólido, laterales manuales, laterales de avance de rueda, pivote central, movimiento lineal (USDA, 1997).

Pereira *et al.*, (2010), menciona que el riego por aspersión resulta adecuado prácticamente a cualquier textura de suelo, gracias a que los aspersores tienen una amplia gama, que permite seleccionar el emisor más apropiado para cada suelo. Además, los aspersores permiten diferentes distanciamientos, con lo que se puede variar la pluviometría según el espaciamiento entre aspersores.

Fuentes & García (1999), mencionan que un sistema de riego por aspersión consta principalmente de los siguientes elementos:

- Una estación de bombeo que generará la presión necesaria en el sistema. Esta estación puede ser desde una simple motobomba, hasta una sofisticada estación de bombeo cuando la extensión de terreno a irrigar es grande.
- Una red de tuberías principales que serán las encargadas de conducir el agua hasta los hidrantes, que son las tomas de agua en las parcelas.
- Una red de tuberías de distribución que conducirán el agua a través de la parcela que se vaya a regar. Se debe diferenciar entre los ramales de alimentación, o también conocido como tubería terciaria y la línea porta aspersores que provienen de los anteriores y son los encargados de conducir el agua hasta los aspersores.
- Emisores de aspersión, que son los dispositivos que repartirán el agua en forma de lluvia sobre la parcela.

## **2.2. Eficiencia de riego**

La eficiencia de riego se define como el porcentaje de agua disponible para el cultivo que el suelo almacena después de un riego, en relación al total de agua que se aplicó (Cisneros, 2003).

Se menciona también que, en riego localizado, la eficiencia de aplicación varía entre 80,00 % a un 95,00 %. Para riego por aspersión la eficiencia oscila entre un 70,00 % y 80,00 % (COFUPRO, 2010).

Los sistemas de riego por goteo, bien diseñados y con un mantenimiento adecuado, son capaces de propiciar altos rendimientos. La eficiencia en el diseño debe ser del 90,00 % al 95,00 % y para eso se debe cuidar y mantener el sistema de obstrucciones y revisar el rendimiento del emisor, pues este podría ser muy variable. Mendoza (2013), menciona que la eficiencia del riego por goteo es del orden del 80,00 % al 90,00 %. Sino se cuidan de estos detalles, al realizar un ensayo de campo, la eficiencia podría ser tan baja como un 60,00 % (Megh & Ramírez, 2007).

## **2.3. Evapotranspiración**

Según Fuentes & García (1999), la evapotranspiración o también conocido como uso consuntivo de agua, hace referencia al agua que una planta transpira, y la cantidad de agua que puede evaporarse de la superficie del suelo, en donde se establece el cultivo. Se distinguen dos formas de evapotranspiración:

- Evapotranspiración potencial o máxima: se define como la cantidad de agua que ha sido consumida en un determinado tiempo, donde el suelo está cubierto por una vegetación homogénea y donde el agua no es una limitante.
- Evapotranspiración real: se define como la cantidad de agua que realmente ha sido consumida por el cultivo en un determinado periodo de tiempo.

Según la FAO (2006), la evapotranspiración (ET), tiene dos procesos que ocurren individualmente. El primer proceso es el agua que se pierde de la superficie del terreno mediante

la evaporación y el segundo proceso es el agua que se pierde de los cultivos mediante la transpiración de la planta.

La evaporación es el proceso mediante el cual, el agua en estado líquido pasa a agua en estado vapor y sale de la superficie evaporante. El agua se evapora de superficies que contengan agua como lagos, ríos, caminos humedecidos, suelos agrícolas y de la superficie de la vegetación mojada.

Para que este cambio de estado se lleve a cabo, se necesita energía, que será proporcionada por la radiación solar directa y la temperatura del ambiente del aire. La diferencia de presión entre el vapor de agua en la superficie evaporante y la presión de agua en la superficie circundante, es la fuerza que retira el vapor de agua de una superficie evaporante. A medida que se va evaporando agua, el aire circundante se va saturando gradualmente y el proceso se torna más lento, pudiendo llegar a detenerse si no se renueva el aire alrededor de la planta, para lo cual este reemplazo de aire saturado por aire fresco depende gradualmente de la velocidad del viento.

Pereira *et al.*, (2010), menciona que la necesidad hídrica de la planta o requerimiento de agua es el resultado de su evapotranspiración (ET) bajo determinadas condiciones ambientales y con un manejo concreto. La ET se define por la sumatoria de dos procesos; siendo el primer proceso la pérdida de agua de la cubierta vegetal del cultivo debido a la transpiración y el segundo proceso la pérdida de agua del suelo debido a la evaporación.

Vásquez *et al.*, (2017), comenta que la evapotranspiración sirve para establecer el consumo de agua de un cultivo, y que para calcular la evapotranspiración se suelen utilizar variables climáticas como temperatura, humedad relativa, radiación solar entre otros.

La evaporación es un proceso físico mediante el cual el agua pasa del estado líquido a vapor; este proceso constituye una de las fases del ciclo hidrológico y está influenciado por factores como viento, temperatura, humedad relativa, radiación, composición y calor del suelo entre otros.

La transpiración es también un fenómeno físico, por el cual el agua sale por los estomas a la atmósfera en estado de vapor de agua. Este proceso no es únicamente pérdida de agua de la planta, sino que también desempeña un papel refrigerante. El proceso de transpiración tiene una magnitud muy elevada.

La FAO (2006), menciona tres diferentes definiciones para la evapotranspiración empleados para el cálculo de las necesidades de agua de los cultivos.

- “Evapotranspiración del cultivo de referencia ( $ET_o$ ): Es la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua, se conoce como evapotranspiración del cultivo de referencia. La superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características específicas.
- Evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar ( $ET_c$ ): Hace referencia a la evapotranspiración en condiciones óptimas presentes en parcelas con un excelente manejo y adecuado aporte de agua y que logra la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas. La evapotranspiración del cultivo puede ser calculada a partir de datos climáticos e integrando directamente los factores de resistencia del cultivo, el albedo y la resistencia del aire en el enfoque de Penman-Monteith. Este enfoque se emplea para la estimación de la tasa de evapotranspiración del cultivo estándar de referencia ( $ET_o$ ), La relación  $ET_c/ET_o$  que puede ser determinada experimentalmente para diferentes cultivos se lo conoce como coeficiente del cultivo ( $K_c$ ), y se lo emplea para poder calcular la  $ET_c$ , por lo que  $ET_c = ET_o * K_c$
- Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ( $ET_{caj}$ ): Cuando no existe un manejo óptimo y se presentaron limitaciones ambientales que afectan el crecimiento del cultivo y que restringen la evapotranspiración. Bajo estas condiciones, la evapotranspiración puede desviarse de la  $ET_c$  debido a factores no óptimos como la presencia de plagas, salinidad, baja fertilidad de los suelos y una limitación o exceso de agua”.

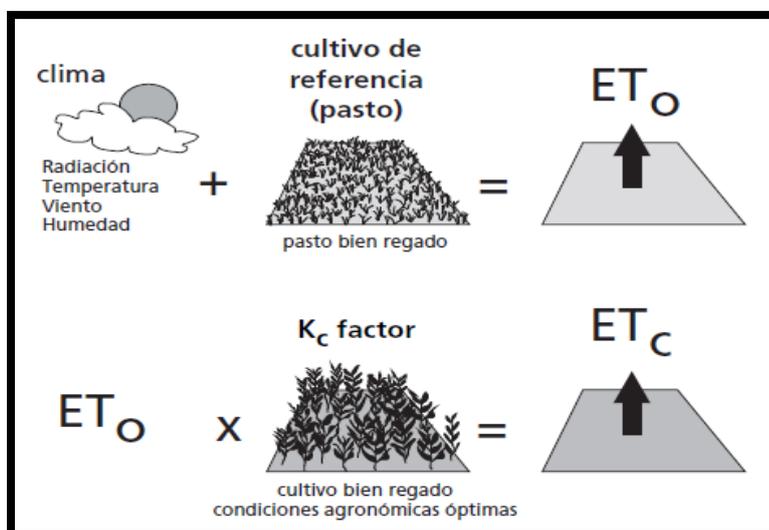


Figura 1. Evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) y evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ).

Fuente: FAO, 2006.

## 2.4. Cálculo de las necesidades de agua de los cultivos

Cisneros (2003), menciona que existen métodos directos e indirectos para calcular las necesidades hídricas de los cultivos. Dentro de los métodos directos se tiene el gravimétrico, el lisimétrico y el evapotranspirómetro de Thornthwaite; y los métodos indirectos pueden clasificarse como métodos basados en dispositivos evaporimétricos y los métodos basados en datos climáticos que comprenden el uso de la radiación, la temperatura y la humedad relativa.

Los autores Fuentes & García (1999), también mencionan los métodos directos e indirectos para el cálculo de la evapotranspiración. Dentro de los métodos directos hacen referencia al uso del lisímetro, pero limitan su uso por su elevado costo y más se lo emplea para investigación. Los métodos indirectos empíricos evalúan la evapotranspiración a partir de datos climáticos donde destacan cuatro métodos estudiados por Doorembos y Pruitt, el método de Blaney-Criddle, de la radiación, la de Penman-Monteith y la del tanque evaporímetro.

### 2.4.1. Método de Blaney-Criddle

Este método se aplica para periodos de un mes, y su fórmula es la siguiente:

$$f = p * (0,46 * t + 8,13) \quad (1)$$

Donde:

f: factor de Blaney-Criddle, expresado en mm de agua diario.

t: temperatura media mensual expresada en °C.

$$t = \frac{T \text{ max media} + T \text{ min media}}{2} \quad (2)$$

p: tanto por uno de horas diurnas del mes respecto de las totales.

### 2.4.2. Método de la radiación

Este método se emplea para periodos de un mes o 10 días, y se parte de la fórmula:

$$E_{to} = W * R_s * c \quad (3)$$

Donde:

$E_{to}$ : evapotranspiración del cultivo de referencia expresado en (mm/d). Tiene el mismo valor para todos los días del periodo considerado.

$R_s$ : radiación solar que llega a la superficie de la tierra expresada en equivalente de evaporación en mm/d.

$W$ : factor de ponderación, que depende de la temperatura y de la altitud.

$c$ : factor de ajuste, que depende de valores estimados de la humedad y del viento.

### 2.4.3. Método de Penman

El método de Penman se puede usar en aquellos lugares donde se ha registrado datos de temperatura, radiación, humedad y viento. Este método resulta uno de los más precisos de los que emplean fórmulas empíricas para estimar las necesidades de agua para los cultivos. Su fórmula es la siguiente:

$$E_{To} = c * (W * R_n + (1 - W) * f * (u) * (e_a - e_d)) \quad (4)$$

Donde:

$E_{To}$ : evapotranspiración del cultivo de referencia, expresado en mm/día.

$e_a$ : presión de saturación del vapor de agua, expresado en milibares.

$e_d$ : presión real del vapor de agua, expresado en milibares.

### 2.4.4. Método Penman-Monteith

Según la FAO (2006), el método de la FAO Penman-Monteith es el único método que se recomienda para establecer la  $E_{To}$  con parámetros climáticos.

Se ha seleccionado este método puesto que es el que estima de una manera muy exacta la ETo de cualquier lugar evaluado. Este método se fundamenta en bases físicas y además considera aspectos tanto fisiológicos como aerodinámicos.

En 1990, la FAO organizó un foro donde asistieron expertos e investigadores en riego, y fue en este evento donde se recomendó que el método para calcular la evapotranspiración de referencia sea el método de Penman-Monteith. *“Este método fue desarrollado haciendo uso de la definición del cultivo de referencia a un cultivo hipotético de altura 0,12 m, resistencia superficial de 70,00 s m<sup>-1</sup> y un albedo de 0,23 y que representa a la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde y altura uniforme, creciendo activamente y sin limitaciones de agua”.*

La fórmula es la siguiente:

$$ET_o = \frac{0,408 * \Delta * (Rn - G) + \gamma * \frac{900}{T + 273} * u_2 * (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma * (1 + 0,34 * u_2)} \quad (5)$$

Donde:

ETo: evapotranspiración de referencia (mm/día)

Rn: radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m<sup>2</sup>/día)

Ra: radiación extraterrestre (MJ m<sup>2</sup>/día)

G: flujo de calor del suelo (MJ m<sup>2</sup>/día)

T: temperatura media del aire a 2,00 m de altura (°C)

u<sub>2</sub>: velocidad del viento a 2,00 m de altura (m/s)

e<sub>s</sub>: presión de vapor de saturación (kPa)

e<sub>a</sub>: presión real de vapor (kPa)

e<sub>s</sub>-e<sub>a</sub>: déficit de presión de vapor (kPa)

Δ: pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C)

γ: constante psicrométrica (kPa/°C)

## 2.5. Programación de riego

Según Vásquez *et al.*, (2017), menciona que en la programación del riego se deben resolver las siguientes interrogantes:

¿Cuándo se debe regar?, ¿Cuánta agua se debe aplicar?, ¿Cuánto tiempo se debe regar?, y ¿Cómo voy a regar? La pregunta de cuándo regar, hace referencia al intervalo de tiempo que va a transcurrir entre riegos; cuánta agua aplicar, a la cantidad de agua que se va a suministrar en cada riego en términos de volumen (mm; m<sup>3</sup>/ha); cuánto tiempo regar, a la duración de cada riego (horas o minutos) y cómo regar se refiere al método de cómo aplicar el agua, ya sea por gravedad, aspersión, goteo u otros.

La respuesta a estas preguntas tendrá como objetivo lograr la maximización de los beneficios, es decir a el uso eficiente del agua de riego. Si el agua no es limitante y su precio es mínimo el riego puede realizarse para buscar el máximo rendimiento del cultivo. Pero, cuando ese no es el caso, y el agua es limitada y su costo es elevado, el riego puede aplicarse de tal forma que el obtener rendimientos menores sin alcanzar el máximo genere un mayor beneficio.

Fuentes & García (1999), mencionan que la programación del riego tiene como finalidad el uso eficiente del agua y de energía, sin reducir la producción si el agua no es limitante, y se debe responder las siguientes interrogantes:

¿Cuándo se debe regar?, ¿Qué cantidad de agua se debe aplicar en cada riego?, y ¿Cuánto tiempo se debe aplicar en cada riego? Para dar respuesta a las dos primeras preguntas, se debe considerar las necesidades de agua del cultivo y las características físicas del suelo para establecer la capacidad de retención de agua; y, para dar respuesta a la tercera pregunta, se debe determinar la permeabilidad del suelo, la velocidad de infiltración y el caudal que se va a aplicar para evitar la formación de charcos de agua.

## **2.6. Necesidades de riego**

Conocer las necesidades de agua de los cultivos es fundamental para poder diseñar, planificar y gestionar los sistemas de riego. Se consideran tres diferentes definiciones de necesidades de agua para poder estimar de una manera correcta los requerimientos hídricos de los cultivos.

Primero, las necesidades hídricas brutas corresponden al volumen de agua que un cultivo necesita para logra un desarrollo óptimo, y se denomina evapotranspiración; segundo, las necesidades netas de riego corresponden a la cantidad de agua que el sistema de riego va a dotar a la zona radicular del cultivo, y esto resulta de la resta entre la demanda bruta de agua y los aportes naturales de agua en este caso la precipitación.

Finalmente, las necesidades brutas de riego de los cultivos, será el volumen de agua que un determinado sistema de riego va a requerir a nivel parcelario.

La eficiencia que presenten los sistemas de riego desde la entrada del sistema hasta la parcela será definida por las pérdidas que sufran en este trayecto, por lo tanto, la necesidad bruta de riego corresponde a las necesidades netas de riego añadido estas pérdidas (Martínez, 2014).

Según la FAO (2002), “*las necesidades netas de riego es el agua que se debe suministrar a través de un sistema de riego con la finalidad de garantizar que el cultivo tenga disponibilidad de agua para una producción normal*”.

Fuentes & García (1999), mencionan que las necesidades netas de riego (Nn) se definen con las siguientes variables:

- Las necesidades de agua del cultivo ETC,
- Aportaciones de la precipitación efectiva
- Aporte por ascenso capilar desde la capa freática cercana a la zona radicular.
- Variación del volumen de agua almacenado en el suelo.

Por lo que las necesidades de riego (Nn) se pueden definir como la evapotranspiración del cultivo menos la precipitación efectiva, el aporte capilar y la variación de almacenamiento del contenido de humedad en el suelo.

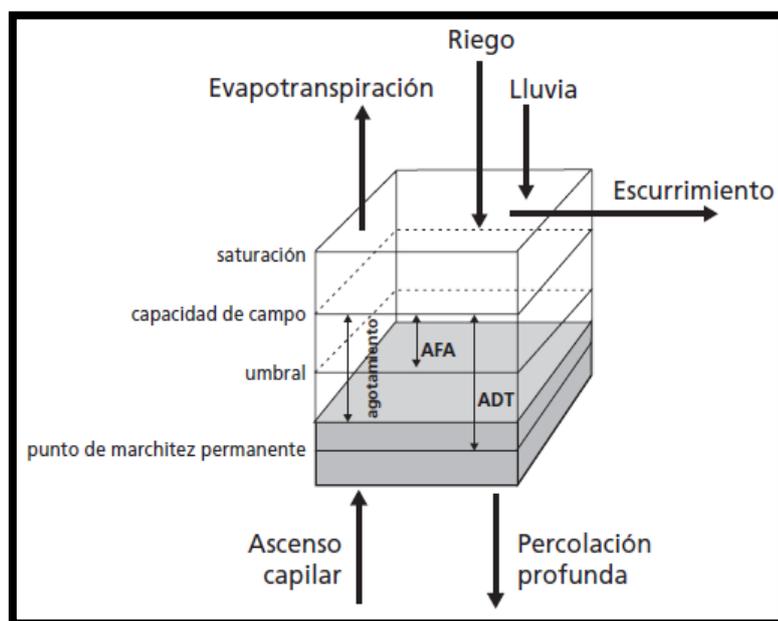


Figura 2. Balance de agua en la zona radicular. Fuente: FAO, 2006.

## **2.7. Respuesta del rendimiento de los cultivos al riego**

Existe una relación directa e inseparable entre la producción de alimentos y el uso de agua. El agua ha sido el recurso que ha condicionado la producción agrícola en varias partes a nivel mundial, especialmente en aquellos lugares donde las precipitaciones no suplen las demandas de los cultivos o donde la variabilidad espacial y temporal no logre satisfacer dichas demandas. En la actualidad existe una competencia por los recursos hídricos cada vez más grande y a su vez una demanda mayor de alimentos debido al crecimiento poblacional, por tal razón hoy más que en el pasado, es fundamental mejorar la eficiencia y productividad del uso del agua, para lograr una producción en el sector agrícola capaz de suplir esta demanda de alimentos, garantizando así la seguridad alimentaria de los próximos años afrontando también los efectos asociados al cambio climático (FAO, 2012).

La disponibilidad de agua para la agricultura se está reduciendo continuamente a causa de la demanda entre el resto de usuarios como son las demandas urbanas, industriales y requerimientos ambientales, lo que ha hecho que el sector agrícola mejore la eficiencia del recurso hídrico. Para lograr esta objetivo de aumentar la productividad del agua, es básico evaluar las funciones agua-rendimiento. La función agua-rendimiento, dará como resultado la relación que existe, entre el rendimiento en función del agua aplicada a cada cultivo. Existen otros factores que influyen en la producción, pero resulta complejo su interacción (Cisneros, González, Martínez, López, & Rey, 2015).

Estudiar las funciones agua-rendimiento y emplear estos resultados en la planificación para el uso y gestión del agua se ha convertido en una herramienta esencial y muy valiosa para realizar planes de manejo que permitan tanto el aumento de la producción del sector agrícola como un uso más eficiente del agua. Son varios los autores que han manifestado la importancia que hay en la planificación y en la operación de sistemas de regadío, el conocer las funciones de agua-rendimiento, pues el contar con este dato, puede servir para mejorar la gestión del agua, establecer normas o criterios en la distribución que permitan una maximización de la producción agrícola empleando el mínimo de agua posible, lo que se podría llamar riego deficitario (González, Herrera, López, & Cid, 2013).

González, Herrera, López, & Cid (2011), mencionan que la disponibilidad del recurso hídrico cada día es menor, por lo que el sector agrícola se ve amenazado al ser el mayor demandante de agua, por tal razón se enfrenta a un reto importante, ser más eficiente con el agua para lograr producir más alimento empleando menos agua. Para esto, resulta vital conocer las funciones agua-rendimiento, para una buena planificación y distribución de agua para los cultivos.

Zhang, Qin, Chen, Shao, & Sun (2017), mencionan que, se necesita un cambio de mentalidad, para no tener el concepto de maximizar la productividad por unidad de área de superficie sembrada, sino que, debido a la escasez de agua a la que se enfrenta el sector agrícola en varias partes del mundo, se debe emplear el concepto de maximizar la productividad por unidad de agua consumida. El concepto de water use efficiency (WUE) en términos generales se define como el grano producido por unidad de agua consumida por el cultivo. Un WUE más alto puede significar que se ha obtenido una misma producción empleando menor cantidad de agua, o que se ha obtenido una producción mayor con el mismo consumo de agua.

## **2.8. Modelos de optimización económica**

Como consecuencia de la escasez de agua, el sector agrícola cada día cuanta con menos agua para satisfacer la demanda de agua de los cultivos. Si esta situación no cambia, el sector agrícola dispone de dos opciones. La primera es seguir sembrando la misma superficie que se ha venido cultivando hasta ahora, pero con la restricción de una dotación menor de agua, con lo que en principio el impacto de esa disminución de agua sería una producción menor. La segunda opción sería disminuir las áreas de cultivo para de esta manera poder satisfacer las necesidades de riego de los cultivos. Se podrían considerar otras alternativas como sería el caso de la modernización de los sistemas de riego para pasar de riego por surco a sistemas de riego presurizado, pero cómo saber cuál de todas las opciones es la mejor. En este contexto De Ortega, Mejía, Palacios, Rendón, & Exebio (2009), mencionan que *“una alternativa al problema de determinar la superficie regable y el patrón de cultivos que maximizan los ingresos netos de los productores puede ser el uso de la programación lineal. La teoría de la programación lineal se ha desarrollado para facilitar la búsqueda de una respuesta al problema.*

*Con respecto a la solución de problemas agrícolas, se pueden utilizar planes óptimos de cultivo sobre la base de niveles determinados de recursos.*

*Una ventaja de emplear estos modelos de optimización en la planeación de sistemas de riego es que permite determinar el patrón de cultivos que maximiza el ingreso neto de los productores dado un conjunto de restricciones”.*

Los autores López, Orengo, Tarjuelo, Martínez & Domínguez (2016), también mencionan la problemática de la escasez de agua y que el recurso hídrico debe ser manejado de una manera eficiente. En la agricultura de regadío, la rentabilidad dependerá del agua disponible y/o el costo de la energía necesaria para poder adjudicar esa agua a los usuarios o directamente el coste de la energía necesaria para que el agricultor lleve esa agua desde la fuente hasta sus cultivos. Durante el siglo XX se llevaron a cabo ecuaciones para poder simular como respondían los cultivos a diferentes dosis de riego, y manejo del cultivo como la aplicación de fertilizantes. Los resultados de estas ecuaciones han sido empleados para desarrollar modelos muy sofisticados como es AQUACROP el cual es un software creado por la FAO y de libre distribución.

Siendo el sector agrícola de regadío el principal consumidor de agua, una buena gestión del recurso hídrico asignado a esta demanda es importante para su sostenibilidad. Existen herramientas y sistemas que facilitan la tarea de la toma de decisiones al momento de decidir la asignación de agua, puesto que son varias las consideraciones que deben plantearse para lograr un buen uso del agua de riego que logre maximizar el margen bruto. Como se ha mencionado, las consideraciones que deben considerarse son múltiples, por ende, lograr este objetivo no es fácil, pero, con la ayuda de un modelo de optimización económica, se puede tomar decisiones acertadas al permitir analizar y evaluar los datos necesarios (Carrión, López, Ortega, & De Juan, 2003).

Generalmente, los modelos de optimización tienen tres componentes. Primero, una función objetivo que es lo que se pretende optimizar ya sea maximizando o minimizando esa función; segundo, las variables que se desean cambiar para poder cumplir la función objetivo; y, el último componente son las restricciones, que son una serie de relaciones que algunas variables deben cumplir. De esta manera, para resolver un problema de optimización, se debe encontrar el valor de las variables que se desean cambiar para que la función objetivo alcance su óptimo cumpliendo la serie de restricciones impuestas al modelo (Ramos, Sánchez, Ferrer, Barquín, & Linares, 2010).

### **2.8.1. MOPECO (Modelo de Optimización Económica del Riego)**

Este modelo fue desarrollado por el CREA (Centro Regional de Estudios del Agua). MOPECO es una herramienta que brinda una valiosa ayuda para la toma de decisiones para establecer la distribución óptima de los cultivos que maximice el margen bruto de los cultivos bajo riego. Más allá de esta opción, este modelo establece la mejor distribución de cultivos que maximiza el margen bruto de una superficie bajo riego. Además, el modelo tiene la capacidad de facilitar varios resultados como fechas de riego y funciones riego-margen bruto (CREA, 2013).

Según Ortega *et al.*, (2004), *“el modelo MOPECO es una herramienta para identificar planes de producción óptimos y estrategias de manejo del riego. El modelo estima la cosecha, la producción, el margen bruto en función de la profundidad del riego. Las funciones de margen bruto se utilizan para determinar un patrón óptimo de cultivo y la estrategia de riego que maximice el margen de ganancia. Las relaciones entre estas variables no son lineales, y el número de estrategias es bastante grande, determinar el proceso óptimo es muy complejo y computacionalmente intensivo; por esa razón se emplean algoritmos genéticos para identificar estrategias óptimas.*

*El Modelo MOPECO comprende tres módulos: (1) estimación de los requerimientos netos de agua; (2) derivación de la relación entre el margen bruto y la profundidad de riego; y (3) identificación del cultivo, planificación y los volúmenes de agua a aplicar”.*

### **2.9. Análisis del riesgo de la variabilidad de precios**

La variabilidad de los precios para cada cultivo presenta oscilaciones según la oferta y demanda del mercado, por esa razón se debe considerar el riesgo que tienen los precios de los distintos cultivos. Como menciona Miguez (2014), *“más allá de aspectos tecnológicas y comerciales, la rentabilidad del negocio agropecuario está definida por los niveles de ingresos y egresos”.* El agricultor en cierta forma puede definir cuáles serán sus gastos o egresos al comienzo de su campaña de cultivo, pero mirando el otro elemento de la ecuación, los ingresos estarán determinados principalmente por el precio que consiga el productor por sus productos al momento de venderlos.

Por otro lado, los precios de los productos a los que el agricultor se enfrentará al momento de la venta no son fijos, sino que variarán y esto hará que el resultado de esta venta sea buena, aceptable o mala.

## **2.10. Cultivos**

La agricultura es la labor del suelo, para el aprovechamiento de cultivos, establecidos por el hombre para satisfacer sus necesidades alimentarias. En la prehistoria, gracias a la agricultura el hombre paso de ser nómada para ser sedentario y poder establecerse y empezar a formar las civilizaciones.

En el área de influencia del sistema de riego Carrizal-Chone los cultivos más significativos por su valor socio económico son el cacao, plátano, café, naranja, maíz, maní, yuca, tomate, pimiento, arroz, y pastizales.

### **2.10.1. Cultivo de cacao**

Según el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP, 2010), el cacao (*Theobroma cacao* L.), es una planta y pertenece a la familia Sterculiaceae, genero *Theobroma*. Esta planta es procedente de Sudamérica, y probablemente de las cuencas de la Amazonía y Orinoco, donde fue descubierta en condiciones naturales.

El cacao es una planta perenne, y dentro de sus características se puede destacar que el ciclo vegetativo puede superar los cien años; presenta una altura que puede alcanzar los 8,00 metros, pero bajo un manejo adecuado no debe superar los 3,00 metros.

Si la planta es sembrada, su sistema radicular tendrá una raíz pivotante que su forma variará dependiendo de la consistencia del suelo en donde se encuentre. En suelos profundos, el sistema radicular del cacao puede profundizar los 2,00 metros; las raíces encargadas de la absorción de nutrientes se encuentran en los primeros 0,30 metros del suelo. Por lo general el tallo durante el primer y segundo año será recto hasta que este alcanza entre 1,00 a 1,50 metros de altura y aparece el molinillo que está compuesto entre 3 a 5 ramas principales, las cuales irán multiplicando en otras ramas secundarias dando la forma al árbol.

El INIAP (1999), define que la densidad de siembra para la siembra de cacao se recomienda que sea de 3,00 m x 3,00 m, 4,00 m x 3,00 m y de 4,00 m x 4,00 m, de esa manera se tienen poblaciones de 1.111,00, 833,00 y 625,00 árboles por hectárea respectivamente.

Además, hace mención a que se requiere un volumen de precipitación que oscile entre los 1.200,00 a 2.500,00 mm anuales de una forma bien distribuida de forma que mensualmente el promedio mínimo sea de 100,00 mm lo que en la realidad no ocurre y ese déficit de agua deberá ser aportado mediante sistemas de riego.

El INIAP (2010), recomienda los híbridos y clones de cacao desarrollados en este instituto para la zona de Manabí, pues se adaptan a las condiciones del medio. Entre los cuales se dispone el híbrido EET-19/EET-110, EET-95/EET-332. EET-103/EET-387 cuyo rendimiento es de 1,00 a 1,50 tm/ha/año.

En cuanto a los clones, se recomienda la siembra del: EET-19, EET-62, EET-95, EET-96 y EET-103 y su rendimiento tiene un promedio de 1,00 a 1,50 tm/ha/año. Sin embargo, existe otro material de cacao, el clon CCN-51 que es la variedad más productiva. Según Villalta (2015), este clon supera las 2,50 tm/ha/año. Así mismo se hace mención en un artículo, que el cacao CCN-51 tiene un alto potencial productivo que varía entre 2,00-3,00 tm/ha/año (El Comercio, 2017).

### **2.10.2. Cultivo de plátano**

Según Ulloa (2012), menciona que el cultivo de plátano pertenece al género *Musa* y destaca que es un cultivo importante para la alimentación mundial debido a su potencial nutricional y en el Ecuador no es la excepción. Aparte que es un cultivo que tiene un alto valor comercial al ser exportado mundialmente generando así fuentes de trabajo.

El plátano es una planta herbácea que se considera perenne, puesto que después de fructificar, las partes aéreas de la planta mueren y desde la base o cormo del plátano nacen los nuevos retoños. El cormo o bulbo es el verdadero tallo del plátano el cuál es un órgano subterráneo. El sistema radicular tiende a ser grueso en las raíces principales y a ramificarse alrededor de la superficie de la planta, siendo los pelos radiculares los encargados de la absorción tanto de agua como de nutrientes explorando estos una profundidad de aproximadamente 0,30 metros.

Los requerimientos de agua oscilan entre los 1.200,00 a 2.500,00 mm anuales, con lluvias bien distribuidas. Por lo general, la densidad de siembra es de 3,00 m x 3,00 m para tener densidades sobre las 1.000,00 plantas por hectárea (Solis, 2007).

Según el INIAP (2012), la producción de plátano puede ser desde tan baja como 5,00 tm/ha/año sin manejos apropiados, u oscilar entre 10,00-20,00 tm/ha/año con buenos materiales y manejo técnico adecuado.

### **2.10.3. Cultivo de café**

El café aparte de ser un producto muy popular alrededor del mundo; es también el segundo producto de mayor importancia económica a nivel mundial (Temis, López, & Sosa, 2011). El café es un arbusto que por lo general no sobrepasa los 4,00-6,00 metros de altura; pertenece a la familia de las Rubiáceas y al género *Coffea*. En lo que respecta a los requerimientos del café para un buen desarrollo es necesario un clima caliente y húmedo, preferiblemente de terrenos sueltos para un buen desarrollo radicular; las precipitaciones se requiere que sean mayores de 1.000,00 mm anuales (Gómez, 2010).

El rendimiento promedio del cultivo de café de grano seco es de 0,32 tm/ha/año para el café Arábigo, el mismo que representa el 63,00 % de la producción nacional, y 0,58 tm/ha/año para al café robusta que representa el restante 37,00% de la producción nacional (MAGAP, 2016).

### **2.10.4. Cultivo de naranja**

El cultivo de naranja (*Citrus sinensis*) es originario de algunas zonas de la India, China, el norte de Australia y Nueva Caledonia. Esta planta pertenece a la familia Rutaceae y al género *Citrus*; dentro de las características de este cultivo, se tiene que la altura de un naranjo puede alcanzar los 6,00 m de altura, pero por lo general mediante podas se intenta que no sobrepase los 3,50 metros; el sistema radicular, más del 70,00 % de las raíces se localizan en el primer metro de suelo y poseen una raíz pivotante que puede penetrar los 2,00 metros de profundidad. Dentro de los requerimientos se establece que, las temperaturas promedio para el desarrollo del cítrico oscilan entre los 23,00 °C a 34,00 °C y, una precipitación media anual entre 900,00 a 1.200,00 mm/año es necesaria para un buen desarrollo de este cultivo.

En el cultivo de naranja, se recomienda densidades de siembra entre 4,00 m x 5,00 m y 5,00 m x 5,00 m, lo que corresponde que por hectárea entren de 400,00 a 500,00 plantas. El rendimiento por hectárea del cultivo de naranja alcanza valores entre 8,00 a 12,00 tm/año (Hernández, 2014).

#### **2.10.5. Cultivo de tomate**

En la actualidad, el tomate (*Lycopersicon esculentum*) es la hortaliza más cultivada en el mundo, debido a su importante valor nutricional como por su demanda para el consumo diario. Esta hortaliza se la puede cultivar en condiciones de invernadero o al aire libre dependiendo de las condiciones del clima, plagas o del manejo que se le vaya a dar. Dentro de las características, el tomate tiene un tallo semileñoso, la altura de la planta puede alcanzar los 2,00-3,00 metros. Esta planta se la puede cultivar desde el nivel del mar hasta los 3.200,00 m.s.n.m. Los requerimientos en lo referente a temperatura deben oscilar entre los 18,00 a 25,00 °C, mientras que se requiere de una precipitación anual de 1.200,00 mm. Las densidades de siembra pueden variar entre 30.000,00 a 50.000,00 plantas por hectárea según la variedad y el manejo que se le vaya a dar. Este cultivo se ha hecho popular gracias a su alta producción y rentabilidad, pues se espera un rendimiento por hectárea entre los 30,00 a 60,00 tm (AAIC, 2003).

#### **2.10.6. Cultivo de pimiento**

El cultivo de pimiento (*Capsicum annum*) es originario de la zona de Bolivia y Perú. Este cultivo pertenece a la familia de las Solanáceas. Las características principales del pimiento es que una planta herbácea, con numerosas raíces adventicias, hojas de forma oval, lanceolada con bodes regulares y peciolo corto. El requerimiento en cuanto a temperatura varía entre 15,00 a 30,00 °C. La precipitación necesaria anualmente se estima que sea de 1.200,00 mm. El pimiento presenta rendimientos que oscilan entre los 8,00 a 20,00 tm/ha (Borbor & Suárez, 2007).

### **2.10.7. Cultivo de maní**

El maní o cacahuete (*Arachis hypogaea*), es una leguminosa y es además es un cultivo muy importante a nivel mundial puesto que contribuye al desarrollo del sector agrícola e industrial de los países donde se lo cultiva. Esta planta presenta altos contenidos de aceite, proteínas, vitaminas y minerales por lo que es en una excelente fuente alimenticia. El cultivo de maní tiene un rendimiento promedio de 2,20 tm/ha por campaña de cultivo (Ayala, 2009).

Según el INIAP (2004), el cultivo de maní se puede realizar desde el nivel del mar hasta una altura de 1.250,00 m.s.n.m. y la temperatura que requiere varía entre 25,00 a 30,00 °C; requiere una precipitación entre 500,00 a 1.000,00 mm para lograr una buena producción.

### **2.10.8. Cultivo de arroz**

En Ecuador, el arroz (*Oryza sativa*) es el principal ingrediente alimenticio de la canasta básica familiar. El año 2004 se sembraron 350.000,00 hectáreas con un rendimiento promedio de 4,00 tm/ha. El arroz es una planta monocotiledónea, pertenece a la familia de las Poaceas. Desde el punto de vista de riego, se distingue el arroz ordinario, que es el que se mantiene bajo inundación, y el arroz montañés que es el que se maneja en condiciones de secano. La temperatura óptima para el desarrollo del arroz va entre los 22,00 a 30,00 °C; se puede cosechar desde el nivel del mar hasta los 1.500,00 m.s.n.m. y requiere de una precipitación de 800,00 a 1.200,00 mm por campaña de cultivo (MAGAP, 2014).

### **2.10.9. Cultivo de maíz**

El cultivo de maíz (*Zea mays*), es una planta originaria de América, donde era base fundamental en la comida de las culturas ancestrales. Pertenece a la familia de las Poaceas, presenta hojas largas de gran tamaño, su sistema radicular es fasciculado y la profundidad de exploración radicular alcanza los 0,50 m.

En el Ecuador el maíz se cultiva a lo largo de todo el territorio nacional y por esta razón se lo considera uno de los productos agrícolas más importantes. La planta de maíz puede llegar a los 2,50 metros. El rendimiento por hectárea a nivel nacional variará mucho, puesto que va a

depender si se ha sembrado semillas de clones o de híbridos siendo estos altamente productivos, consecuentemente, el rango oscila entre 4,00 a 12,00 tm/ha; la densidad de siembra que se recomienda va desde las 50.000,00 a 70.000,00 plantas por hectárea.

El maíz requiere una temperatura de 25,00 a 30,00 °C, y en cuanto a precipitaciones requiere de 400,00 a 650,00 mm de agua en forma bien distribuida en cada campaña de cultivo que se realice (Izquierdo, 2012).

#### **2.10.10. Cultivo de yuca**

Según Zambrano (2016), menciona que, en el Ecuador, la yuca (*Manihot esculenta*), es un tubérculo que es considerado como parte fundamental de la seguridad alimentaria de la población ecuatoriana. El cultivo de yuca se lo puede realizar desde el nivel del mar hasta los 1.200,00 m.s.n.m. y, requiere una temperatura promedio de 24,00 °C. Esta planta puede alcanzar los 2,50 metros de altura. La yuca requiere una precipitación entre 900,00 y 1.200,00 mm anuales bien distribuidos a lo largo del año para lograr un desarrollo fisiológico bueno. En Ecuador, el rendimiento promedio es de 9,00-10,00 tm/ha. manejando una densidad de siembra de 10.000,00 plantas/ha.

#### **2.10.11. Cultivo de pasto**

El cultivo de pasto pertenece a la familia de las Poaceas. El pasto es una planta herbácea y se han clasificado más de 800 géneros y 12.000 especies.

El sistema radicular de las gramíneas se compone de raíces adventicias y seminales está compuesto por las raíces seminales y las adventicias. La estructura de sostén del pasto se lo denomina caña en el cual se conforman una serie de nudos. Los requerimientos climáticos del pasto, en lo referente a temperatura va entre los 20,00 a 30,00 °C, y requiere de precipitaciones anuales de 1.200,00 mm que estén bien distribuidos a lo largo del año (Calderón & Rodríguez, 2016).

# CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

## 3.1. Lugar de estudio

El presente trabajo se realizó, para el área de influencia del sistema de riego Carrizal-Chone, perteneciente a la Cuenca del río Chone con un área de 2.600,00 km<sup>2</sup>, y se encuentra ubicada en la provincia de Manabí-Ecuador.

Este proyecto de riego inicia en la represa “La Esperanza”, la misma que tiene un volumen de embalse de 400,00 hm<sup>3</sup>. Desde ahí inicia el sistema de riego presurizado, el cual tiene un área de regadío de 10.000,00 hectáreas, las cuales se distribuyen en 4 cantones de la provincia de Manabí y son: Bolívar, Chone, Junín y Tosagua. (Anejo I)



Figura 3. Área de influencia del sistema de riego Carrizal-Chone. Fuente: Google-earth 2017.

Tabla 1. Coordenadas UTM del área de influencia del sistema de riego Carrizal-Chone.

Coordenadas UTM (17 M)		
EXTREMO DE LA CUENCA	LONGITUD	LATITUD
NORTE	599913 E	9924626 S
SUR	588255 E	9896781 S
ESTE	603142 E	9901592 S
OESTE	584587 E	9913324 S

Fuente: Elaboración propia.



Figura 4. Ubicación del área de influencia del sistema de riego Carrizal-Chone en el mapa de Ecuador.

Fuente: Google-earth 2017.

### 3.2. Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos fueron proporcionados por la Estación Meteorológica de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí (ESPAM “M.F.L”). Esta Estación Meteorológica se encuentra operativa desde finales del 2010, por lo que se ha utilizado datos de algo más de 6 años.

*Tabla 2. Datos mensuales promedio de variables climáticas.*

	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Humedad relativa (%)	Precipitación (mm)	Heliofanía (h/d)	Velocidad del viento (m/s)
<b>Enero</b>	29,73	22,15	85,00	187,45	1,52	1,27
<b>Febrero</b>	30,53	22,35	85,17	282,40	3,25	1,73
<b>Marzo</b>	31,68	23,20	83,17	225,90	3,65	1,73
<b>Abril</b>	30,98	22,90	83,83	138,60	3,79	1,80
<b>Mayo</b>	31,18	22,35	83,67	74,75	2,96	1,55
<b>Junio</b>	30,40	22,30	83,17	29,90	2,96	1,35
<b>Julio</b>	29,65	21,65	83,83	30,55	2,63	1,50
<b>Agosto</b>	29,95	21,25	81,00	1,10	2,95	1,50
<b>Septiembre</b>	30,78	21,50	80,00	0,13	3,94	1,90
<b>Octubre</b>	30,18	21,50	80,17	6,28	2,52	1,70
<b>Noviembre</b>	30,80	21,30	77,83	1,27	2,60	2,00
<b>Diciembre</b>	30,33	24,40	77,50	38,03	2,81	1,75

*Fuente: Elaboración propia.*

### **3.3. Textura del suelo.**

Según un estudio realizado, se determinó que la textura de suelo que predomina el área de influencia del sistema de riego Carrizal-Chone es entre media y moderadamente fina, lo que permite establecer que los suelos tienen una textura franco-arcillosa (Clavijo & Peñaherrera, 2013).

### **3.4. Socioeconomía**

Según un estudio realizado por la FAO (2010), en la cuenca del río Chone viven 170.000,00 habitantes, y la distribución de género es muy equilibrada con un 50,20 % de hombres y 49,80 % de mujeres. La población joven (menores de 15 años) es del 34,00 %, mientras que la población mayor es únicamente del 9,00 % (mayores de 60 años); la densidad poblacional es de 64 habitantes por km<sup>2</sup>. La población rural es del 57,00 %, mientras que la urbana es del 43,00 %. El desarrollo económico de la población rural se corresponde con la importancia del sector agropecuario en cuanto a la generación de ocupación productiva. La producción agropecuaria se ve muy favorecida por el clima, el suelo y la disponibilidad de agua para los cultivos. Entre los cultivos que sobresalen se tiene el maíz, maní, yuca, arroz, café, cacao, plátano, naranja, ciertas hortalizas y los pastizales, pues de este cultivo depende el sector

ganadero que es sobresaliente, pues se debe alimentar a las más de 150.000 cabezas de ganado vacuno.

### **3.5. Sistema de riego Carrizal-Chone**

Ortiz (2015), menciona que el sistema de riego Carrizal-Chone se inicia en la represa “La Esperanza”, cuyo nombre oficial es “Sixto Durán Ballén” y forma parte del proyecto integral Chone-Portoviejo. Es la segunda presa de más capacidad de almacenamiento, con 400,00 hm<sup>3</sup> después de la represa Daule-Peripa que tiene una capacidad de almacenamiento de 6.000,00 hm<sup>3</sup>. La Esperanza está ubicada en el cantón Bolívar, parroquia Quiroga entre las coordenadas 602875 S, 99016272 E, aproximadamente a 12,00 kilómetros de la ciudad de Calceta.

Las sequías de Manabí han sido algo periódico, por lo que la población se veía en la necesidad de migrar en busca de trabajo pues el sector agrícola no era rentable bajo esas condiciones. Y, la cara opuesta de la moneda era que, debido a fuertes precipitaciones, se producían inundaciones. Para tratar de remediar estos problemas en los años 1970 se realiza el estudio y diseño de proyecto que comprendía lo siguiente:

- Regulación del recurso hídrico con fines de agua potable, riego e hidroenergía
- Control de inundaciones
- Control de flujos de agua dulce para la industria acuícola en el estuario del río Chone.

El sistema de riego consta de dos ramales de 2.200,00 mm de diámetro que nacen en la represa La Esperanza y se van ramificando para crear la red de distribución del sistema de riego. El agua se presuriza en el sistema debido a la diferencia de cota entre el embalse y las áreas de riego, por lo que la presión del sistema a nivel parcelario oscila entre 20,00 a 40,00 m.c.a. (Metro columna de agua), presión suficiente para implementar riego por goteo o hasta riego por aspersión.

### 3.6. Metodología

Se realizó la estimación de la evapotranspiración de referencia y del cultivo para los 11 cultivos más importantes del área de influencia del sistema de riego Carrizal-Chone, cacao, plátano, café, naranja, maíz, maní, pimienta, tomate, yuca, arroz y pastizales mediante el método del manual FAO 56.

Se emplearon los datos climáticos de la Estación Meteorológica de la “ESPAM MFL”. De esta manera se obtuvo las necesidades totales de riego para cada cultivo, calendarios y programación de riego. Y, finalmente se determinaron los costos de producción para cada uno de los cultivos, y a su vez con un número de precios históricos de venta de los cultivos, se realizó una simulación de Monte Carlo para generar precios simulados que tengan una media más estable.

Por último, ya conociendo las necesidades de riego para cada cultivo, los costos de producción de venta y la producción de cada cultivo, se empleó un modelo de optimización económica para maximizar el margen-bruto. Cabe mencionar que se asignó un costo significativo del agua de 0,05 US\$/m<sup>3</sup>. Se aplicó este modelo en tres escenarios, que corresponden a 3 precios de venta diferentes obtenidos de la simulación de Monte Carlo. El primer escenario corresponde a un precio de venta de cada producto del percentil 80; el segundo escenario corresponde al precio de venta promedio; y, finalmente el tercer escenario corresponde a un precio de venta del percentil 20. De esa manera se contempla una variabilidad de los precios. Cada uno de los escenarios descritos anteriormente, fueron comparados con un escenario sin optimizar, asignando la máxima necesidad total de riego por cultivo, y dedicando una misma superficie de siembra a cada cultivo correspondiente a 909,09 hectáreas.

#### 3.6.1. Estimación de la Evapotranspiración de referencia

Para realizar la estimación del cultivo de referencia (ET<sub>o</sub> mm/d) se empleó el método que propone la FAO en su manual 56 “Evapotranspiración del cultivo”. La fórmula empleada para estimar la ET<sub>o</sub> fue la ecuación de Penman-Monteith (Anejo II):

$$ET_o = \frac{0,408 * \Delta * (Rn - G) + \gamma * \frac{900}{T + 273} * u_2 * (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma * (1 + 0,34 * u_2)} \quad (5)$$

Donde:

ETo: evapotranspiración de referencia (mm/día)  
Rn: radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m<sup>2</sup>/día)  
Ra: radiación extraterrestre (MJ m<sup>2</sup>/día)  
G: flujo de calor del suelo (MJ m<sup>2</sup>/día)  
T: temperatura media del aire a 2,00 m de altura (°C)  
u<sub>2</sub>: velocidad del viento a 2,00 m de altura (m/s)  
e<sub>s</sub>: presión de vapor de saturación (kPa)  
e<sub>a</sub>: presión real de vapor (kPa)  
e<sub>s</sub>-e<sub>a</sub>: déficit de presión de vapor (kPa)  
Δ: pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C)  
γ: constante psicrométrica (kPa/°C)

Para emplear esta fórmula se necesitan los siguientes datos:

- Parámetros atmosféricos:
  - Calor latente de vaporización
  - Presión atmosférica
  - Constante psicrométrica
  
- Parámetros relacionados con temperatura y humedad relativa:
  - Temperatura media
  - Tensión de saturación de vapor
  - Tensión de vapor real
  - Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor-temperatura
  
- Radiación:
  - Radiación extraterrestre
  - Radiación neta de onda corta entrante
  - Radiación de onda larga saliente
  - Radiación neta
  
- Flujo térmico en el suelo

Para obtener los parámetros atmosféricos se debe proceder de la siguiente manera:

- Calor latente de vaporización ( $\lambda$ ):

Expresa la energía requerida para cambiar una masa de agua líquida a vapor de agua cuando la temperatura y la presión son constantes. Viene dado por la expresión de Harrison:

$$\lambda = 2,501 - (2,361 * 10^{-3}) * T \quad (6)$$

Donde:

T: temperatura media del aire (°C)

$\lambda$ : calor latente de vaporización (MJ.kg<sup>-1</sup>)

La FAO propone que, dado que la variación de un rango de temperaturas donde se desarrollan los cultivos no es excesiva, se tome un valor constante de 2,45 MJ.kg<sup>-1</sup> correspondiente a agua pura de densidad de 1.000,00 kg m<sup>3</sup> y una temperatura de 20,00 °C.

- Presión atmosférica (P):

Mide la presión que ejerce la columna de aire de la atmósfera terrestre y se puede calcular a partir de la siguiente expresión propuesta por Burman *et al.*, (1987), citado por (FAO, 2006):

$$P = 101,3 * \left( \frac{293 - 0,0065 * z}{293} \right)^{5,26} \quad (7)$$

Donde:

P: presión atmosférica (kPa)

Z: altura sobre el nivel del mar a la que se encuentra la estación meteorológica (m)

- Constante psicrométrica ( $\gamma$ ):

Este parámetro indica la capacidad que tiene para evaporar agua a partir de cambios de presión atmosférica a igualdad del resto de variables. Se puede obtener a partir de la fórmula de Brunt:

$$\gamma = \frac{Cp * P}{\epsilon * \lambda} \quad (8)$$

Donde:

Cp: calor específico a presión constante ( $1,013 * 10^{-3} \text{ MJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

$\lambda$ : calor latente de evaporación ( $\text{MJ kg}^{-1}$ )

$\epsilon$ : relación entre el peso molecular del aire húmedo y el aire seco. Tiene un valor de 0,622

P: presión atmosférica (kPa)

Considerando los coeficientes anteriores, la ecuación quedaría de la siguiente forma.

$$\gamma = 0,00163 * \frac{P}{\lambda} \quad (9)$$

Para obtener los parámetros de temperatura y humedad relativa:

- Temperatura media (Tmedia):

Es el promedio de la temperatura máxima y mínima.

$$T_{media} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (10)$$

- Presión de saturación de vapor ( $e_s$ ):

La presión de saturación de vapor se puede calcular en función de la temperatura del aire, puesto que depende de ella. Esta relación se expresa como:

$$e^{\circ}(T) = 0,6108 * \exp * \left[ \frac{17,27 * T}{T + 237,3} \right] \quad (11)$$

Donde:

$e^{\circ}(T)$ : presión de saturación de vapor a la temperatura del aire (kPa)

T: temperatura del aire (°C)

exp: exponencial

Ahora se procede a calcular

$$es = \frac{e^{\circ}(Tmax) + e^{\circ}(Tmin)}{2} \quad (12)$$

- Presión de vapor real ( $e_a$ ):

Para el cálculo de la presión de vapor real, se emplea la fórmula de Tetens con la temperatura máxima y la temperatura mínima y también los datos de humedad relativa máxima y mínima.

$$ea = \frac{e^{\circ}(Tmin) * \frac{HRmax}{100} + e^{\circ}(Tmax) * \frac{HRmin}{100}}{2} \quad (13)$$

Donde:

$e_a$ : presión de vapor real (kPa)

$e^{\circ}(Tmax)$ : presión de vapor de saturación a temperatura máxima (kPa)

HRmin: humedad relativa mínima diaria (%)

$e^{\circ}(Tmin)$ : presión de vapor de saturación a temperatura mínima (kPa)

HRmax: humedad relativa máxima diaria (%)

- Pendiente de la curva presión-temperatura ( $\Delta$ ):

Se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\Delta = \frac{2504 * \exp * \left(\frac{17,27 * T}{T + 237,2}\right)}{(T + 237,3)^2} \quad (14)$$

Donde:

$\Delta$ : pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C<sup>-1</sup>)

T: temperatura media del aire (°C)

e°(T): presión de vapor de saturación a la temperatura T (kPa)

Para obtener los parámetros de radiación:

- Radiación solar extraterrestre (Ra):

$$Ra = \frac{24 * 60}{\pi} * G_{sc} * dr * [\omega_s * \sin(\varphi) * \sin(\delta) + \cos(\varphi) * \cos(\delta) * \sin(\omega)] \quad (15)$$

Donde:

Ra: radiación solar extraterrestre (MJ m<sup>2</sup> min<sup>-1</sup>)

G<sub>sc</sub>: constante solar (0,0820 MJ m<sup>2</sup> min<sup>-1</sup>)

$\omega_s$ : ángulo de la radiación a la hora de la puesta del sol en radianes. Su valor se obtiene empleando la siguiente fórmula:

$$\omega_s = \arccos * [-\tan(\varphi) * \tan(\delta)] \quad (16)$$

Donde:

$\omega$ : latitud en la que se encuentra la estación meteorológica expresada en radianes

$\delta$ : declinación solar expresada en radianes y su valor se obtiene de la siguiente fórmula:

$$\delta = 0,409 * \sin\left(\frac{2\pi}{365} * J - 1,39\right) \quad (17)$$

Siendo  $J$ : día juliano, siendo el número 1 el uno de enero y 365 o 366 el treinta y uno de diciembre

$d_r$ : inversa de la distancia relativa entre la tierra y el sol. Su valor se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$d_r = 1 + 0,033 * \cos * \left(\frac{2\pi}{365} * J\right) \quad (18)$$

- Radiación neta ( $R_n$ ):

La radiación neta se expresa de la siguiente manera:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (19)$$

Donde:

$R_n$ : radiación neta ( $\text{MJ m}^2 \text{ día}^{-1}$ )

$R_{ns}$ : radiación neta de onda corta entrante ( $\text{MJ m}^2 \text{ día}^{-1}$ )

$$R_{ns} = (1 - \alpha) * R_s \quad (20)$$

Siendo:

$\alpha$ : albedo o coeficiente de reflexión

$R_s$ : radiación solar entrante ( $\text{MJ m}^2 \text{ día}^{-1}$ )

$$R_s = \left( a_s + b_s * \frac{n}{N} \right) * R_a \quad (21)$$

Siendo:

n: duración real de la insolación (horas día<sup>-1</sup>)

N: duración máxima posible de insolación (horas día<sup>-1</sup>)

$$N = \frac{24}{\Pi} * W_s \quad (22)$$

a<sub>s</sub>+b<sub>s</sub>: fracción de la radiación extraterrestre que llega a la tierra en días despejados

a<sub>s</sub>: 0,25

b<sub>s</sub>: 0,5

R<sub>nl</sub>: radiación neta de onda larga saliente (MJ m<sup>2</sup> día<sup>-1</sup>)

$$R_{nl} = \sigma * \left[ \frac{T_{max, K^4} + T_{min, K^4}}{2} \right] * (0,34 - 0,14 * \sqrt{e_a}) * (1,35 * \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35) \quad (23)$$

Siendo:

σ: constante de Stefan-Boltzmann (4,903\*10<sup>-9</sup> K<sup>-4</sup> m<sup>2</sup> día<sup>-1</sup>)

T<sub>max,K</sub>: temperatura máxima absoluta del día (K= °C+273,16)

T<sub>min,K</sub>: temperatura mínima absoluta del día (K= °C+273,16)

e<sub>a</sub>: presión de vapor real (kPa)

R<sub>s</sub>: radiación solar entrante (MJ m<sup>2</sup> día<sup>-1</sup>)

R<sub>so</sub>: Radiación solar para un día sin nubes (MJ m<sup>2</sup> día<sup>-1</sup>)

$$R_{so} = (0,75 + 2 * 10^{-5} * z) * R_a \quad (24)$$

Donde:

z: elevación de la estación meteorológica sobre el nivel del mar (m)

Para calcular el flujo térmico en el suelo:

- Flujo térmico en el suelo (G)

$$G = 0,1 * (T_i - T_{i-1} - 1) \quad (25)$$

Donde:

$T_i$ : temperatura media del aire del día actual (°C)

$T_{i-1}$ : temperatura media del aire del día anterior (°C)

0,1: factor de conversión empírico para transformar a MJ m<sup>2</sup> día<sup>-1</sup>

### 3.6.2. Estimación de la Evapotranspiración del cultivo mediante el Kc dual

Para estimar la evapotranspiración del cultivo (ETc mm/día), se empleó el coeficiente dual del cultivo Kc para considerar las pérdidas de agua por transpiración (Kcb) y evaporación (Ke) por separado (Anejo III).

$$ETc = (Kcb + Ke) * ETo \quad (26)$$

Donde:

ETc: evapotranspiración del cultivo (mm/d)

ETo: evapotranspiración de referencia

Kcb: coeficiente basal del cultivo

Ke: coeficiente de evaporación del suelo

El procedimiento para calcular la ETc, se lo puede realizar empleando el Kc único o el Kc dual como es en este caso. El procedimiento de cálculo del Kc dual se divide en las siguientes etapas:

- Calcular la Evapotranspiración (ET<sub>o</sub>, previamente calculado).
- Selección de la duración de las etapas para cada cultivo y la selección de los valores del coeficiente basal del cultivo (K<sub>cb</sub>) inicial, medio y final (FAO 56).

*Tabla 3. Fases, coeficiente basal y altura de cada cultivo.*

Cultivo	Fase (días)				Coeficiente basal del cultivo (K <sub>cb</sub> )			Altura del cultivo (m)		
	Inicio	Desarrollo	Medio	Final	Inicio	Medio	Fin	inicio	Medio	Fin
Cacao	60	90	120	95	0,90	1,00	1,00	3,00	3,50	3,50
Naranja	60	90	120	95	0,75	0,70	0,75	3,00	3,50	3,50
Café	60	90	120	95	0,80	0,90	0,90	1,50	2,00	2,00
Plátano	120	60	180	5	0,60	1,10	1,05	0,50	3,00	3,00
Pimiento	20	25	30	15	0,15	1,00	0,80	0,05	1,80	1,80
Maíz	20	35	40	30	0,15	1,15	0,15	0,05	2,00	1,80
Tomate	25	35	35	25	0,15	1,15	0,70	0,05	1,50	1,50
Yuca	20	40	90	60	0,15	0,70	0,20	0,10	1,50	1,50
Maní	20	30	40	15	0,15	1,10	0,50	0,05	0,60	0,60
Arroz	30	30	30	30	1,00	1,15	0,70	0,05	1,00	1,00
Pasto	60	90	120	95	0,30	0,70	0,70	0,15	0,30	0,30

*Fuente: Elaboración propia.*

- Ajustar K<sub>cb</sub> medio y final a las condiciones climáticas aplicando la siguiente fórmula:

$$K_{cb}(m, f) = K_{cb}(m, f)_{\text{tabla}} + [0,04 * (u_2 - 2) - 0,004 * (RH_{\min} - 45)] * \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (27)$$

Donde:

K<sub>cb</sub> (m,f): m representa el coeficiente basal del cultivo en la etapa media y f la etapa final

K<sub>cb</sub>(m,f) tabla: representa el valor obtenido de la tabla para el coeficiente basal de la etapa media y final

U<sub>2</sub>: velocidad del viento medida a 2,00 metros de altura (m/s)

RH<sub>min</sub>: humedad relativa mínima en la etapa de media o fin de temporada (%)

h: altura del cultivo en la etapa de media o fin de temporada (m)

- Construir la curva del coeficiente basal del cultivo.

Para construir la curva de Kcb, se lo realiza indicando los cuatro periodos del cultivo, inicial, desarrollo, medio y final en el eje de las abscisas. Con los datos obtenidos de la tabla del manual del FAO 56, se trazan líneas para el Kcb inicial, Kcb Medio y el Kcb final que sería el punto final de la recta. A continuación, se debe unir con dos líneas desde el final del Kcb inicial hasta el Kcb medio para determinar el Kcb desarrollo y se procede de igual manera para unir el Kcb medio hasta el Kcb final.

Para unir los valores de Kcb inicial con Kcb medios y Kcb medios con Kcb fin se debe hacer una interpolación con los datos que se obtuvieron de la tabla de Kcb.

La fórmula para realizarlo es la siguiente:

$$Kcb_i = Kcb_{prev} + \left[ \frac{i - \Sigma(L_{prev})}{L_{etapa}} \right] * (Kcb_{prox} - Kcb_{prev}) \quad (28)$$

Donde:

I: número del día dentro de la temporada de crecimiento

Kcb<sub>i</sub>: coeficiente basal del cultivo para el día i

L<sub>etapa</sub>: duración de la etapa considerada (días)

Σ(L<sub>prev</sub>): suma de las duraciones de las etapas previas (días)

- Determinar el coeficiente de evaporación (Ke) diario de evaporación superficial

Para calcular el coeficiente de evaporación del suelo se aplicó la siguiente formula:

$$Ke = \min(Kr * (Kc_{max} - Kcb); Few * Kc_{max}) \quad (29)$$

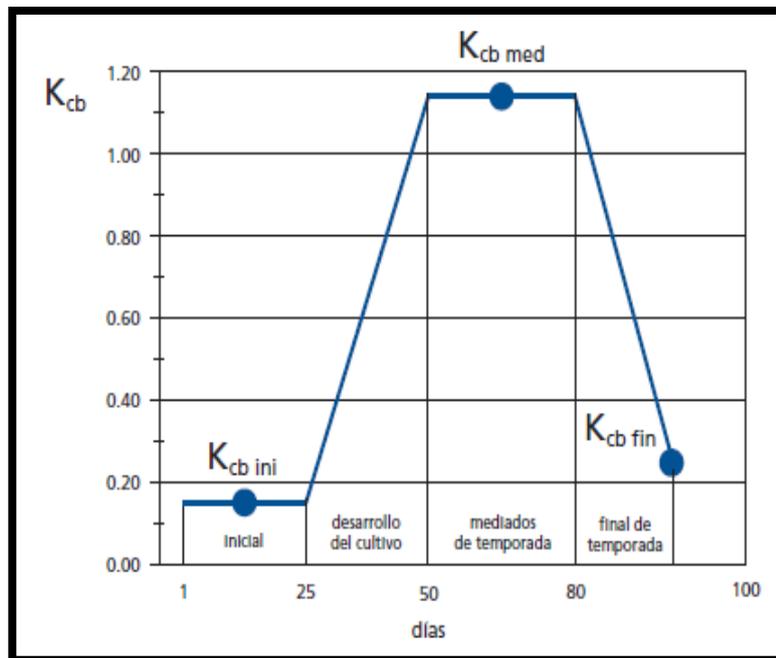


Figura 5. Construcción de la curva de Kcb según las fases del cultivo.  
Fuente: FAO, 2006.

Donde:

Ke: coeficiente de evaporación en el suelo

Kcb: coeficiente basal del cultivo

Kr: coeficiente adimensional de reducción de la evaporación

Few: fracción de suelo que se encuentra simultáneamente expuesto y humedecido, es decir la fracción de la superficie del suelo a partir de la cual ocurre la mayor parte de la evaporación

Kcmax: valor máximo de Kc después del riego o lluvia, y se lo calcula de la siguiente manera:

$$Kcmax = \max \left( \left\{ 1,2 + [0,04 * (u2 - 2) - 0,004 * (HRmin - 45)] \left( \frac{h}{3} \right)^{0,3} \right\} Kc \right) \quad (30)$$

Siendo:

h: altura máxima promedio de las plantas durante el periodo de cálculo considerado (m)

Kcb: coeficiente basal del cultivo

max(): valor máximo entre los parámetros que están separados por ;

Para calcular el coeficiente de reducción de la evaporación del suelo ( $K_r$ ) se calculó la cantidad máxima de agua evaporable empleando la siguiente fórmula:

$$AET = 1000 * (\theta_{FC} - 0,5\theta_{WP}) * Ze \quad (31)$$

Donde:

AET: agua evaporable total. Es la lámina máxima de agua que puede ser evaporada en el suelo cuando la capa superficial del mismo ha sido inicialmente humedecida por completo (mm)

$\theta_{FC}$ : contenido de humedad en el suelo a capacidad de campo ( $m^3 m^{-3}$ )

$\theta_{WP}$ : contenido de humedad en el suelo a punto de marchitez permanente ( $m^3 m^{-3}$ )

Ze: profundidad de la capa del suelo que es sujeta al secado a través de la evaporación (0,1-0,15 m)

Para calcular ( $K_r$ ) se empleó la siguiente fórmula:

$$K_r = \frac{AET - De, i - 1}{AET - AFE} \quad \text{Para } De, i - 1 > AFE \quad (32)$$

Donde:

$K_r$ : coeficiente adimensional de reducción de la evaporación, dependiente del agotamiento de la humedad en la parte superior del suelo ( $K_r=1$  cuando  $De, i-1$  sea menor o igual a AFE)

$De, i-1$ : lámina acumulada de evaporación en la capa superficial del suelo al final del día anterior (mm)

AET: lámina acumulada máxima de evaporación en la capa superficial del suelo cuando  $K_r=0$  (mm)

AFE: agua fácilmente evaporable

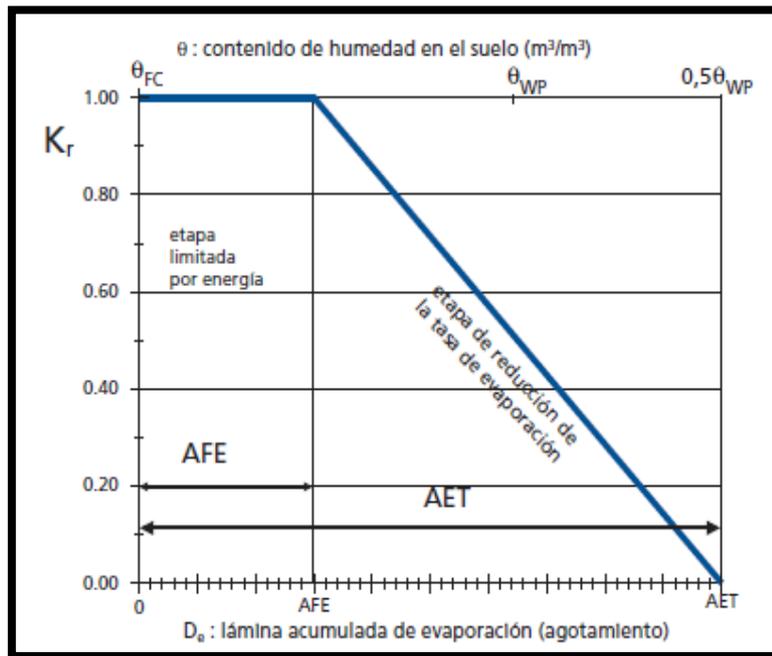


Figura 6. Coeficiente de estrés hídrico ( $K_s$ ) según el contenido de humedad en el suelo.  
Fuente: FAO, 2006.

Para calcular el coeficiente de fracción humedecida y expuesta del suelo ( $F_{ew}$ ) se aplicó la siguiente fórmula:

$$F_{ew} = \min(1 - f_c; f_w) \quad (33)$$

Donde:

$1-f_c$ : fracción expuesta del suelo, la cual no se encuentra cubierta por la vegetación (0,01-1)

$f_w$ : fracción promedio de la superficie del suelo humedecida por el riego o la lluvia (0,01-1)

Para obtener la fracción cubierta del suelo ( $f_c$ ) se la obtuvo mediante la fórmula:

$$f_c = \left[ \frac{K_{cb} - K_{cmin}}{K_{cmax} - K_{cmin}} \right]^{1+0,5 \cdot h} \quad (34)$$

Donde:

$f_c$ : fracción efectiva de la superficie del suelo que se encuentra cubierta por la vegetación (0-0,99)

$K_{cb}$ : coeficiente del cultivo para un día o periodo determinado

$K_{cmin}$ : valor mínimo de  $K_c$  para suelo sin cobertura y seco (0,1-0,2)

$K_{cmax}$ : valor máximo de  $K_c$  inmediatamente después del humedecimiento

$h$ : altura promedio de la planta (m)

- Obtención del  $K_c = K_{cb} + K_e$

Una vez se ha calculado los pasos anteriores y se ha determinado el valor de  $K_{cb}$  y de  $K_e$ , se multiplica esos valores por la  $ET_o$  y así se determina que cantidad de agua la planta está transpirando y el suelo evaporando (mm/día).

- Calcular  $ET_c = K_c * ET_o$

Para determinar la  $ET_c$  (mm/día) se multiplica la evapotranspiración por el coeficiente del cultivo  $K_c$ .

### **3.6.3. Estimación de la Evapotranspiración del cultivo ajustado bajo condiciones de estrés hídrico**

Para estimar la  $ET_c$  ajustada bajo condiciones de estrés hídrico se empleó la siguiente fórmula:

$$ET_{caj} = (K_s * K_{cb} + K_e) * ET_o \quad (35)$$

Donde:

$ET_{caj}$ : evapotranspiración del cultivo ajustada bajo condiciones de stress hídrico (mm/día)

$K_s$ : factor de stress hídrico

$K_{cb}$ : coeficiente basal del cultivo

$K_e$ : coeficiente de evaporación

$ET_o$ : evapotranspiración de referencia (mm/día)

Posteriormente se calculó la cantidad máxima de agua que el suelo pueda retener; esto va a estar limitado por la textura del suelo. La fórmula para calcularlo es:

$$TAW = 1000 * (\theta_{fc} - \theta_{wp}) * Z_r \quad (36)$$

Donde:

TAW: agua total disponible para la planta en la zona radicular (mm)

$\theta_{fc}$ : contenido de agua en el suelo a capacidad de campo ( $m^3/m^3$ )

$\theta_{wp}$ : contenido de agua en el suelo a punto de marchitez permanente ( $m^3/m^3$ )

$Z_r$ : profundidad de raíces (m).

Del total de agua disponible (TAW), solo una fracción está realmente disponible para la planta si se quiere que no presente estrés. A esta fracción se la denomina como agua fácilmente aprovechable (RAW) y se la calculó de la siguiente manera:

$$RAW = p * TAW \quad (37)$$

Donde:

p: Fracción de agotamiento ( $\approx 0,3$ )

Para calcular el factor de estrés hídrico ( $K_s$ ) se determinó a partir de la siguiente:

$$K_s = \frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} = \frac{TAW - D_r}{(1 - p) * TAW} \quad (38)$$

Donde:

$K_s$ : coeficiente de estrés hídrico

$D_r$ : Agotamiento en la zona radicular (mm)

TAW: Agua total disponible en la zona radicular (mm)

RAW: Agua fácilmente disponible en la zona radicular (mm)

p: Fracción de TAW que el cultivo puede emplear sin sufrir estrés hídrico

Se considera que cuando  $D_r < RAW$ ,  $K_s = 1$

Para evaluar la respuesta del rendimiento de los cultivos al agua se empleó la ecuación que plantearon Doorembos y Kassam (1979) publicado en el Manual de Riego y Drenaje n°33 de la FAO. La ecuación es la siguiente:

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right) = K_y * \left(1 - \frac{ET_{caj}}{ET_c}\right) \quad (39)$$

Donde:

$K_y$ : factor de respuesta a la producción

$ET_{caj}$ : evapotranspiración ajustada para la situación de estrés hídrico (mm)

$ET_c$ : evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (mm)

$Y_a$ : rendimiento real obtenido

$Y_m$ : rendimiento máximo posible

### 3.6.4. Programación del riego

Para poder establecer la programación de riego se determinaron las necesidades netas de riego; siendo esta la cantidad de agua que se debe aportar mediante riego para que la planta pueda suplir lo que ha evapotranspirado. Su fórmula es la siguiente:

$$NRn = ET_c - Pe - \Delta G \pm \Delta W \quad (40)$$

Donde:

$NRn$ : necesidades de riego netas (mm/día)

$ET_c$ : evapotranspiración del cultivo (mm/día)

$\Delta G$ : aporte hídrico capilar (mm/día)

$\Delta W$ : variación de la humedad del suelo entre dos riegos consecutivos (mm/día)

$Pe$ : precipitación efectiva (mm/día)

$$Pe = P * (A * 1.25) \quad (41)$$

Siendo:

Pe: precipitación efectiva (mm)

P: precipitación total (mm)

A: fracción de área sombreada obtenido mediante:

$$A = \frac{\pi * D^2}{4 * a * b} \quad (42)$$

Donde:

D: diámetro de la sombra creada por la copa de los cultivos (m)

a\*b: marco de plantación (m)

En la programación del riego se contempla la eficiencia del sistema que dependerá si es por goteo, aspersión o por inundación y también se añade el factor de lavado para evitar que la acumulación de sales en la zona radicular tenga un impacto negativo sobre el cultivo

Para calcular la fracción de lavado se aplicó la siguiente fórmula:

En riego por goteo:

$$LR = \frac{CE_r}{2 * CE_{max}} \quad (43)$$

Donde:

LR: fracción de lavado

CE<sub>r</sub>: conductividad eléctrica del agua de riego (mmhos/cm)

CE<sub>max</sub>: conductividad eléctrica que produce 100,0 % las pérdidas en el cultivo (mmhos/cm)

En riego por aspersión:

$$LR = \frac{CEr}{5 * CEE - CEr} \quad (44)$$

Donde:

CEE: conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo (mmhos/cm)

Conociendo la eficiencia y la fracción de lavado, se calcula las necesidades totales de riego ( $NT_r$ ) que será el máximo entre la eficiencia y la fracción de lavado. Se lo calculó de la siguiente manera:

$$NT_r = \frac{NRn}{ER}; \frac{NRn}{1 - LR} \quad (45)$$

Donde:

$NT_r$ : necesidades de riego totales (mm/día)

Para establecer el tiempo de riego se lo obtuvo mediante la siguiente expresión:

$$T = \frac{NT_r * a * b}{ne * qe * I} \quad (46)$$

Donde:

$NT_r$ : necesidades de riego totales (mm/día)

I: intervalo entre riegos (días)

$q_e$ : caudal nominal del emisor (l/h)

$n_e$ : número de emisores por planta

$a*b$ : marco de plantación (m)

### 3.6.5. Análisis del riesgo de la variabilidad de precios

Para el análisis del riesgo de la variabilidad económica, de los precios de los diferentes cultivos, se buscó en la página del Ministerio de Agricultura Ganadería Acuicultura y Pesca (MAGAP), los precios históricos para cada uno de los cultivos de interés. La finalidad de este análisis es establecer mediante simulación, valores robustos para los precios de los diferentes cultivos, pues en el sector agrícola la variabilidad de precios tiene fluctuaciones que pueden significar un buen ingreso económico para el agricultor, o en el peor de los casos una importante pérdida económica.

*Tabla 4. Precios históricos de los cultivos.*

Fecha	Precio en dólares por tonelada métrica										Pasto (\$ ha/año)
	Cacao	Café	Naranja	Plátano	Tomate	Pimiento	Maíz	Arroz	Yuca	Maní	
may-17	1.835	2.743	240	490	317	650	323	831	240	2.400	400
abr-17	2.048	2.846	240	420	390	1.450	318	820	240	2.420	400
mar-17	1.844	2.883	350	420	614	750	318	792	260	2.620	400
feb-17	2.095	3.065	420	460	549	550	320	836	240	2.350	400
ene-17	1.943	3.095	570	460	851	520	319	858	240	2.180	400
dic-16	2.103	3.290	560	510	695	630	317	880	270	2.100	400
nov-16	2.126	3.015	520	540	544	580	322	880	250	2.160	400
oct-16	2.387	3.245	450	550	618	660	322	891	240	2.120	400
sep-16	2.735	3.611	420	530	575	530	327	902	230	2.040	400
ago-16	2.761	3.334	340	460	676	730	339	968	210	2.100	400
jul-16	2.921	3.210	280	440	583	760	348	1.001	210	2.120	400
jun-16	2.835	3.216	260	340	401	810	317	946	200	2.040	400
may-16	3.004	3.170	300	330	325	920	306	935	240	2.100	400
abr-16	3.059	2.674	340	340	341	870	302	979	230	2.180	400
mar-16	3.207	2.659	450	320	605	840	298	1.001	190	2.250	400
feb-16	2.950	2.804	460	340	457	480	303	979	200	2.300	400
ene-16	2.949	2.478	510	420	347	460	310	961	240	2.280	400
dic-15	2.761	2.560	540	510	465	620	302	968	200	2.220	400
nov-15	3.211	2.787	410	510	333	880	299	968	200	2.380	400
oct-15	3.327	2.572	300	510	714	390	299	1.008	240	2.470	400
sep-15	3.259	2.661	300	490	999	440	312	1.016	220	2.420	400
ago-15	3.114	2.670	280	480	841	850	329	1.008	200	2.300	400
jul-15	3.102	2.652	260	360	510	830	349	1.012	210	2.270	400
jun-15	**	**	240	310	364	820	311	1.012	280	2.320	400
may-15	**	**	380	290	438	770	306	977	260	2.650	400
abr-15	**	**	440	290	523	1.140	311	1.012	240	2.830	400

mar-15	**	**	580	320	474	740	307	994	230	2.950	400
feb-15	**	**	590	320	421	690	303	836	200	2.820	400
ene-15	**	**	570	420	643	540	308	836	200	2.600	400

\*\* Datos no disponibles.

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se empleó el software STATGRAPHICS, donde se estableció para cada lista de precios históricos su distribución estadística, y según esa distribución en el software Excel y mediante el complemento XLsim, se realizó una simulación empleando el método de Monte Carlo; donde se ejecutó para cada cultivo una simulación de un millón de lanzamientos para obtener datos más robustos y con mayor fiabilidad.

De todos los datos obtenidos, se empleó el precio correspondiente al percentil 80, 20 y el valor promedio para cada cultivo.

### 3.6.6. Modelo optimización económica

Para realizar el modelo de optimización económica primero se empleó la ecuación (39) de Doorenbos y Kassam para establecer las necesidades de riego que logren rendimientos del 100,00, 90,00, 80,00 y 70,00%. Una vez conocido eso, se obtuvieron las funciones agua-rendimiento y posteriormente agua-margen bruto para cada uno de los cultivos. Para calcular el margen bruto se empleó la siguiente fórmula:

$$MB = \sum_{i=1}^N As * ((Pr * Pv) - Cp - (W * Pw)) \quad (47)$$

Donde:

N: número de cultivos

$\Sigma$ : sumatoria

i: representa cada cultivo analizado

As: superficie dedicada por cultivo (ha)

MB: margen-bruto total (US\$)

Pr: producción (tm/ha)

Pv: precio de venta (US\$/tm)

Cp: costo de producción (US\$/ha)

W: riego aplicado a cada cultivo ( $m^3/ha$ )

Cw: costo del agua (US\$/ $m^3$ )

El precio del  $m^3$  de agua se estableció en un valor de 0,05 US\$ para realizar los análisis de costos de producción y para el modelo de optimización económica.

El modelo empleado sigue la metodología MOPECO (Modelo de optimización económica del agua de riego), la cual consiste en lo siguiente:

1. Mediante datos climáticos, de suelo y del cultivo determinar las necesidades de riego.
2. Obtener la función agua-rendimiento considerando una aplicación de agua entre el 100,00 % y el 70,00 % de las necesidades totales de riego.
3. Determinar los costos de producción para cada uno de los cultivos.
4. Obtener la función agua-margen bruto
5. Optimizar el área regable de cada cultivo y la profundidad de riego, conociendo el volumen total de agua y superficie disponible.
6. Conseguir la distribución óptima de los cultivos y de la asignación de agua de regadío que maximizan el margen bruto.

La asignación óptima de agua de regadío, para los diferentes cultivos tiene tres escenarios; el primero, corresponde cuando los precios de venta de los productos cosechados tienen un valor correspondiente al percentil 80; el segundo, corresponde cuando estos precios de venta alcanzan el valor promedio; y, finalmente el tercer escenario, refleja cuando los precios de venta son del percentil 20. De esta manera, se analizó la asignación óptima de agua y la mejor distribución de los cultivos según su precio para de esta manera maximizar el margen bruto.

La función objetivo, empleada en el modelo de optimización fue la de maximizar el margen bruto de la sumatoria de los cultivos. Las variables que el modelo cambiaba para lograr esa función fueron la de el volumen de agua a aplicar y la superficie a sembrar para cada cultivo. Todo esto sujeto a las restricciones que serán iguales para los 3 escenarios planteados para maximizar el margen bruto mediante la asignación óptima de agua de riego y la superficie a cultivar para los diferentes cultivos. Dentro de las restricciones, los cultivos que tienen una superficie a cultivarse se establecieron bajo esas condiciones, puesto que comercialmente se busca una variabilidad de productos, más allá que tradicionalmente se han cultivado dichos cultivos.

**Función objetivo:**

$$\Pi = \text{Max } MB$$

Donde:

$\Pi$ : función objetivo

Max: maximizar

MB: margen-Bruto (US\$)

**Variables de decisión:**

As: superficie dedicada por cultivo (ha)

W: riego aplicado a cada cultivo (m<sup>3</sup>/ha)

**Restricciones:**

- El volumen total de agua debe ser igual a 100 hm<sup>3</sup>.

$$\sum_{i=1}^N W = 100 \text{Hm}^3$$

Donde:

N: número de cultivos

$\Sigma$ : sumatoria

i: representa cada cultivo analizado

W: riego aplicado a cada cultivo (m<sup>3</sup>/ha)

- El área total debe ser igual a 10.000 ha.

$$\sum_{i=1}^N As = 10.000 \text{ ha}$$

Donde:

N: número de cultivos

$\Sigma$ : sumatoria

i: representa cada cultivo analizado

As: superficie dedicada por cultivo (ha)

- La asignación de agua para cada cultivo no debe ser mayor al volumen que logra un rendimiento del 100,00 %, y no debe ser menor que el volumen que permite un rendimiento del 70,00 %.

$$\sum_{i=1} W \leq 100\%; \geq 70\%$$

- El cultivo de cacao tendrá un área igual a 1.500,00 ha, el cultivo de café 800,00 ha, el cultivo de naranja 1.000,00 ha, el cultivo de plátano 1.000,00 ha, el cultivo de pasto 900,00 ha y el cultivo de yuca tendrá un área igual a 200,00 ha.

$$As(Cacao) = 1.500 \text{ ha}$$

$$As(Café) = 800 \text{ ha}$$

$$As(Naranja) = 1.000 \text{ ha}$$

$$As(Plátano) = 1.000 \text{ ha}$$

$$As(Yuca) = 200 \text{ ha}$$

$$As(Pasto) = 900 \text{ ha}$$

- El cultivo de pimiento, tomate, maní, arroz y maíz tendrá un área menor o igual a 1.500,00 ha ó mayor o igual a 250,00 hectáreas.

$$As(Pimiento, Tomate, Maní, Arroz, Maíz) \leq 1.500 \text{ ha}; \geq 250 \text{ ha}$$

- La sumatoria de los cultivos de pimiento, tomate, maní, arroz y maíz debe ser igual a 4.600,00 hectáreas.

$$\sum_{N=5} As (Pimiento + tomate + maní + arroz + maíz) = 4.600 \text{ ha}$$

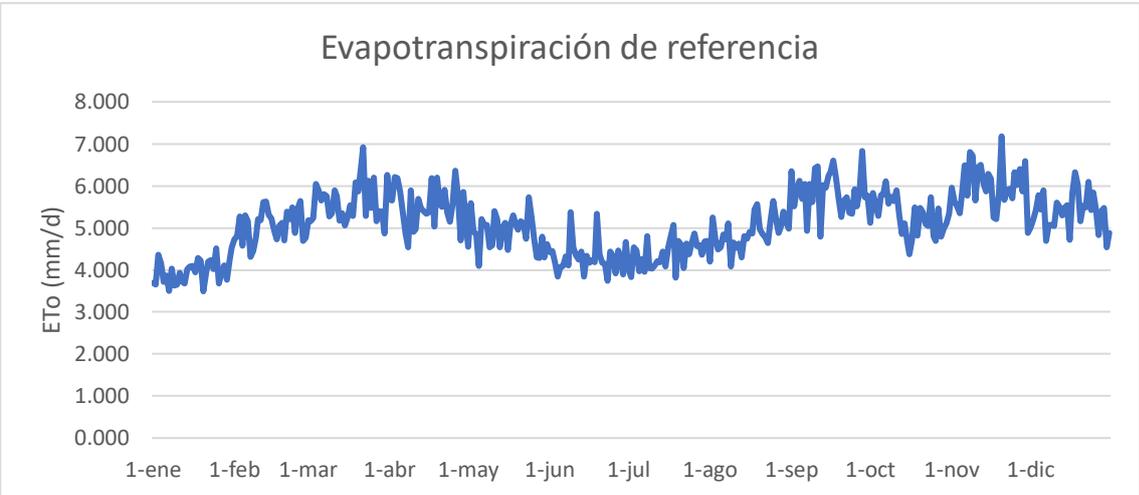
Cada uno de los 3 escenarios, fue comparado con el escenario respectivo, pero sin optimización, esto quiere decir, que se le asignó la máxima cantidad de agua a todos los cultivos, suponiendo que el agua no es limitante, y cada cultivo tiene la misma superficie de siembra, esto significa un área de 909,09 hectáreas para cada cultivo. De esta manera, se comparó el margen-bruto, el uso total del agua, para observar la ventaja de implementar, un modelo de optimización económica.

# CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## 4.1. Presentación de los resultados

A continuación, se muestran los resultados del cálculo de la evapotranspiración de referencia, la evapotranspiración del cultivo para los 11 cultivos seleccionados para su estudio bajo las condiciones edafo-climáticas del área de influencia del sistema de riego Carrizal-Chone. Finalmente se presentan los resultados del riesgo de la variabilidad de los precios de venta de los cultivos y juntamente los resultados del modelo de optimización hidro económico.

### 4.1.1. Evapotranspiración de referencia ETo (mm día<sup>-1</sup>)



**Figura 7. Evapotranspiración de referencia del área de influencia del sistema de riego Carrizal-Chone.**  
*Fuente: Elaboración propia.*

La evapotranspiración de referencia tiene un valor anual de 1.858,00 mm y oscila a lo largo del año, siendo los valores máximos de 7,18, 6,91 y 6,82 mm día<sup>-1</sup> los meses de noviembre, marzo y septiembre respectivamente y los valores mínimos de 3,50 y 3,74 mm día<sup>-1</sup> los meses de enero y junio respectivamente. El promedio anual de ETo es de 5,09 mm día<sup>-1</sup>.

#### 4.1.2. Evapotranspiración del cultivo ETc (mm día-1) y programación del regadío en condiciones sin estrés hídrico

##### Cultivo de cacao:

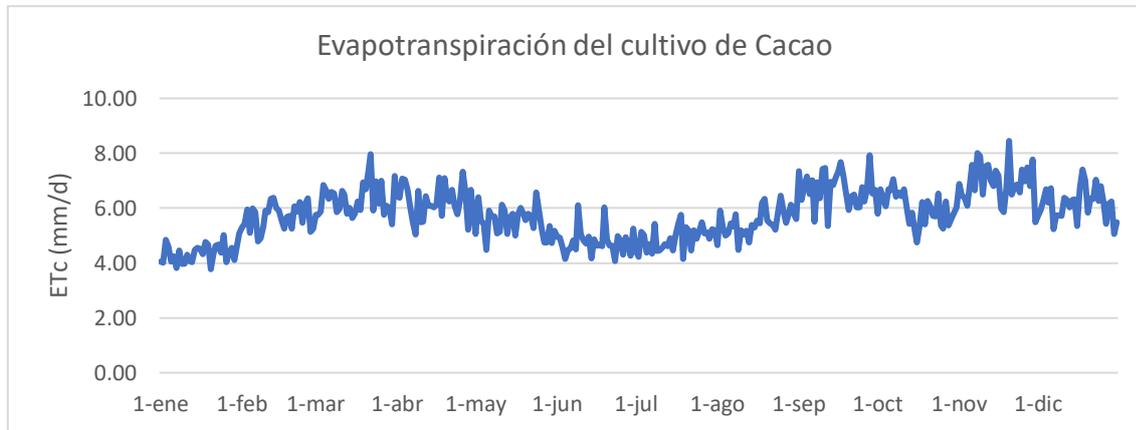


Figura 8. Evapotranspiración del cultivo de cacao. Fuente: Elaboración propia.

La evapotranspiración del cultivo de cacao tiene un valor de 2.098,58 mm anual. En la figura (8), se observa que los valores más altos de ETc corresponden a los meses de marzo, septiembre y noviembre con 8,00, 7,95 y 8,45 mm día<sup>-1</sup> respectivamente. Y los valores más bajos los meses de enero y junio con 3,77 y 4,06 mm día<sup>-1</sup>. El promedio anual es de 5,75 mm día<sup>-1</sup>.

La planificación del regadío para este cultivo indica que la necesidad de riego será de 1.458,00 mm lo que corresponde a 14.580,00 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> al año. El cacao al regarse con un sistema de riego por aspersión tendrá una eficiencia de riego del 75,00 %, por lo tanto, la necesidad neta de agua será de 1.944,00 mm o lo que es igual a 19.440,00 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> al año y en cada riego se aplicará una lámina fija de 24,00 mm. En verano el intervalo entre riegos será menor, mientras que en la época de invierno el intervalo entre riegos será mayor.

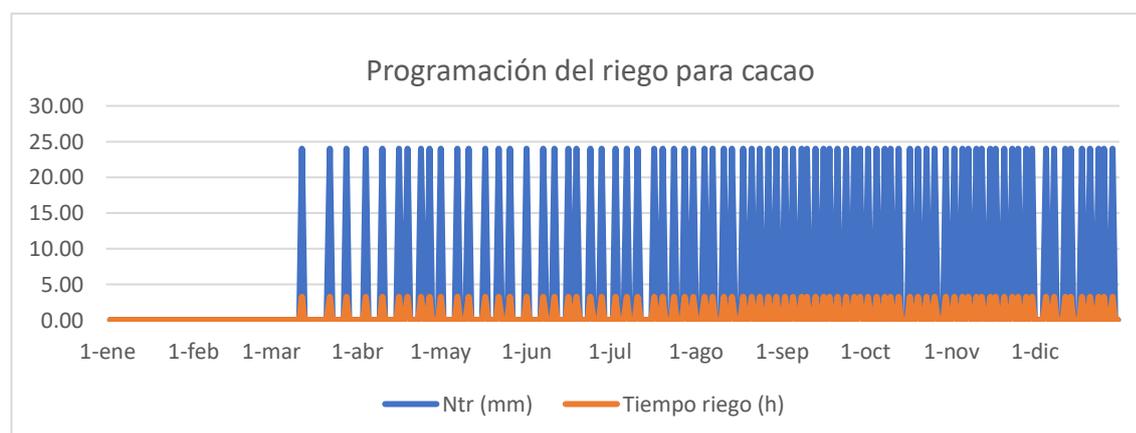
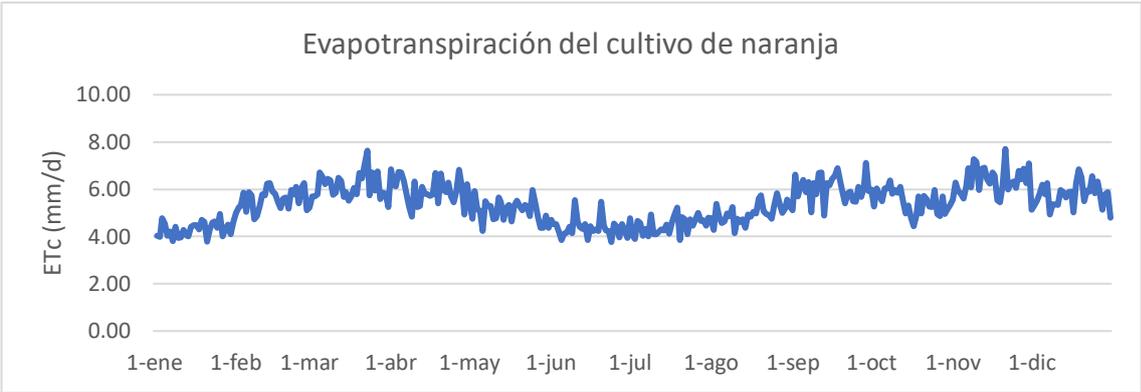


Figura 9. Programación de riego para el cultivo de cacao. Fuente: Elaboración propia.

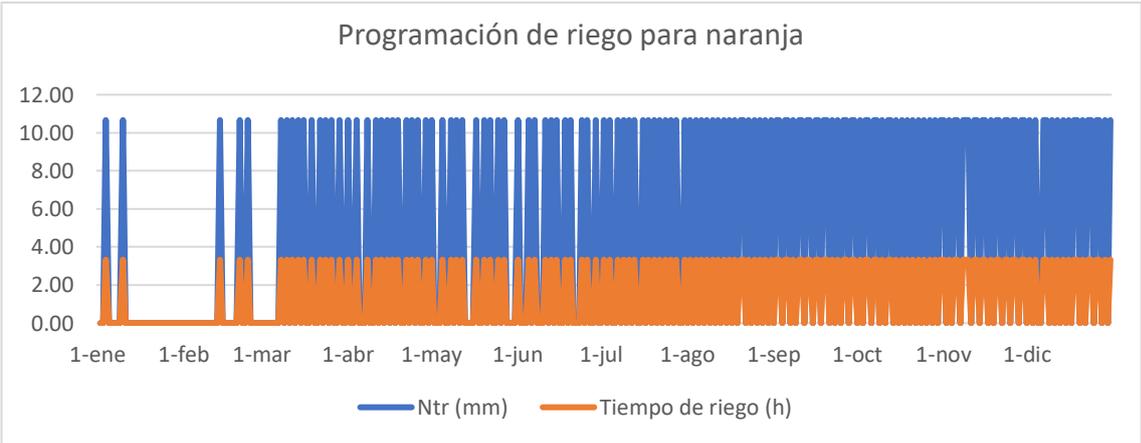
**Cultivo de naranja:**

La evapotranspiración del cultivo de naranja tiene un valor anual de 1.961,88 mm, además, como se observa en la figura (10), presenta los valores más altos de ETc en los meses de marzo, septiembre y noviembre con 7,64, 7,12 y 7,70 mm día<sup>-1</sup> respectivamente. Y los valores más bajos los meses de enero y junio con 3,77 y 3,76 mm día<sup>-1</sup>. El promedio anual es de 5,38 mm día<sup>-1</sup>.



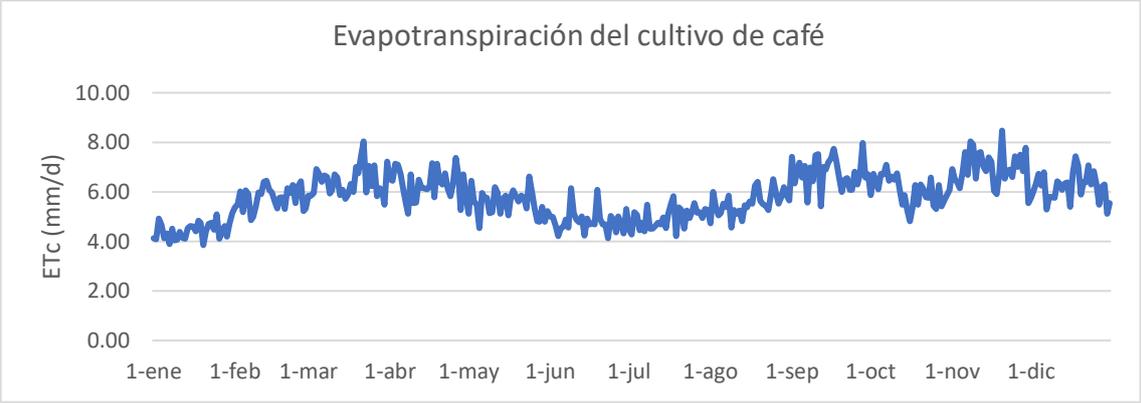
*Figura 10. Evapotranspiración del cultivo de naranja. Fuente: Elaboración propia.*

La planificación del regadío para este cultivo indica que la necesidad de riego será de 1.449,60 mm lo que corresponde a 14.496,00 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> al año. La naranja al regarse con un sistema de riego por goteo tendrá una eficiencia de riego del 90,00 %, por lo tanto, la necesidad neta de agua será de 1.610,67 mm o lo que es igual a 16.106,70 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> al año y en cada riego se aplicará una lámina fija de 10,67 mm. En verano el intervalo entre riegos será menor, mientras que en la época de invierno el intervalo entre riegos será mayor.



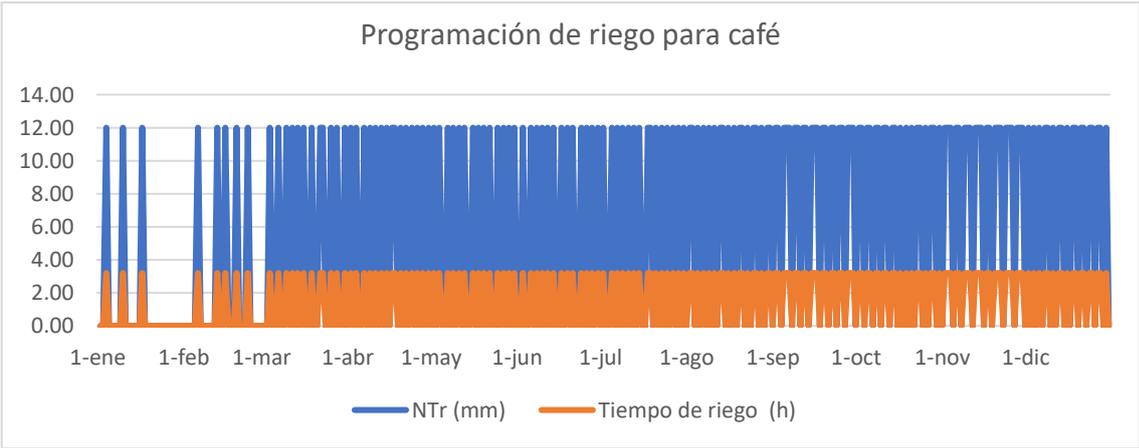
*Figura 11. Programación de riego para el cultivo de naranja. Fuente: Elaboración propia.*

**Cultivo de café:**



**Figura 12. Evapotranspiración del cultivo de café.** Fuente: Elaboración propia.

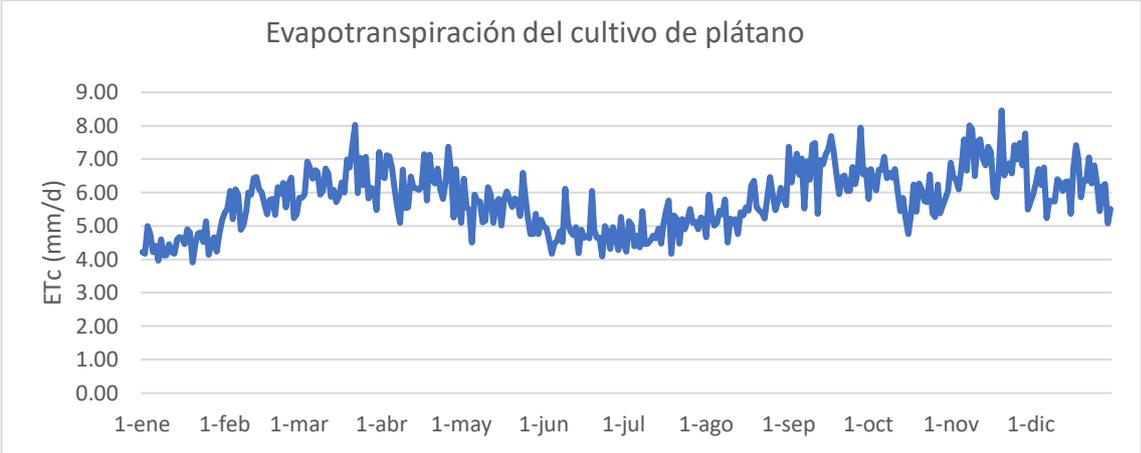
El cultivo de café presenta una variación de la ETc a lo largo del año, alcanzando valores máximos los meses de marzo, septiembre y noviembre con valores de 8,03, 7,98 y 8,47 mm día<sup>-1</sup> respectivamente; mientras que los valores de ETc más bajos se alcanzan los meses de enero y junio con un valor de 3,85 y 4,13 mm día<sup>-1</sup>. Tiene una ETc anual de 2119,50 mm, siendo el promedio anual de 5,81 mm día<sup>-1</sup>.



**Figura 13. Programación de riego para el cultivo de café.** Fuente: Elaboración propia.

La planificación del regadío para este cultivo indica que la necesidad de riego será de 1.689,60 mm lo que corresponde a 16.896,00 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> al año. El café al regarse con un sistema de riego por microaspersión tendrá una eficiencia de riego del 80,00 %, por lo tanto, la necesidad neta de agua será de 2.112,00 mm o lo que es igual a 21.120,00 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> al año y en cada riego se aplicará una lámina fija de 12,00 mm. En verano el intervalo entre riegos será menor, mientras que en la época de invierno el intervalo entre riegos será mayor.

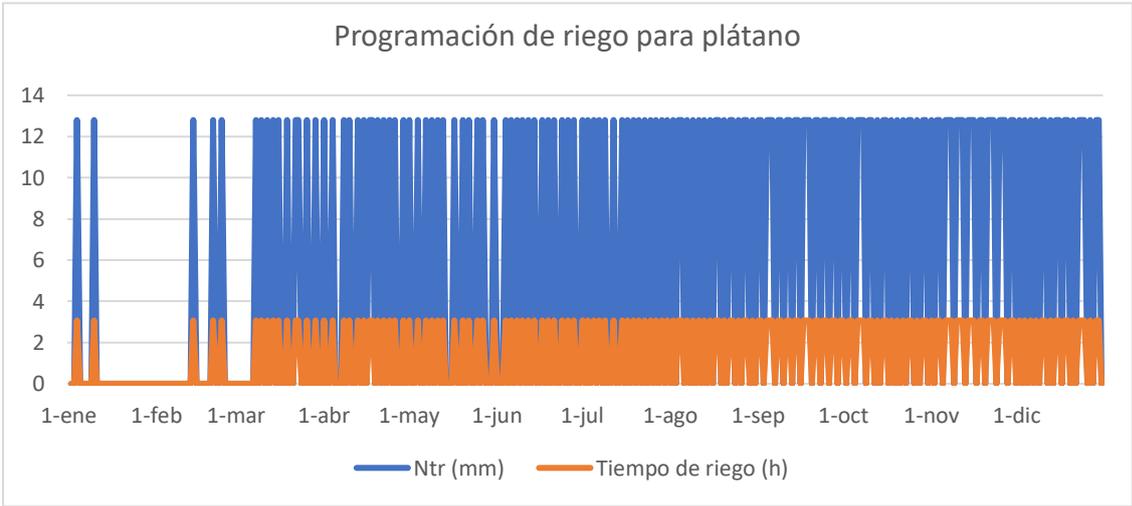
**Cultivo de plátano:**



*Figura 14. Evapotranspiración del cultivo de plátano. Fuente: Elaboración propia.*

La evapotranspiración del cultivo de plátano tiene un valor anual de 2.113,00 mm y, presenta valores máximos los meses de marzo, septiembre y noviembre con 8,03, 7,95 y 8,46 mm día<sup>-1</sup> y valores mínimos los meses de enero y junio con 3,91 y 4,08 mm día<sup>-1</sup>; el valor medio de ETc es de 5,79 mm día<sup>-1</sup>.

La planificación del regadío para este cultivo indica que la necesidad de riego será de 1.574,40 mm lo que corresponde a 15.744,00 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> al año. El plátano al regarse con un sistema de riego por aspersión tendrá una eficiencia de riego del 75,00 %, por lo tanto, la necesidad neta de agua será de 2.099,20 mm o lo que es igual a 20.992,00 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> al año y en cada riego se aplicará una lámina fija de 12,80 mm. En verano el intervalo entre riegos será menor, mientras que en la época de invierno el intervalo entre riegos será mayor.



*Figura 15. Programación de riego para el cultivo de plátano. Fuente: Elaboración propia.*

## Cultivo de pimienta:

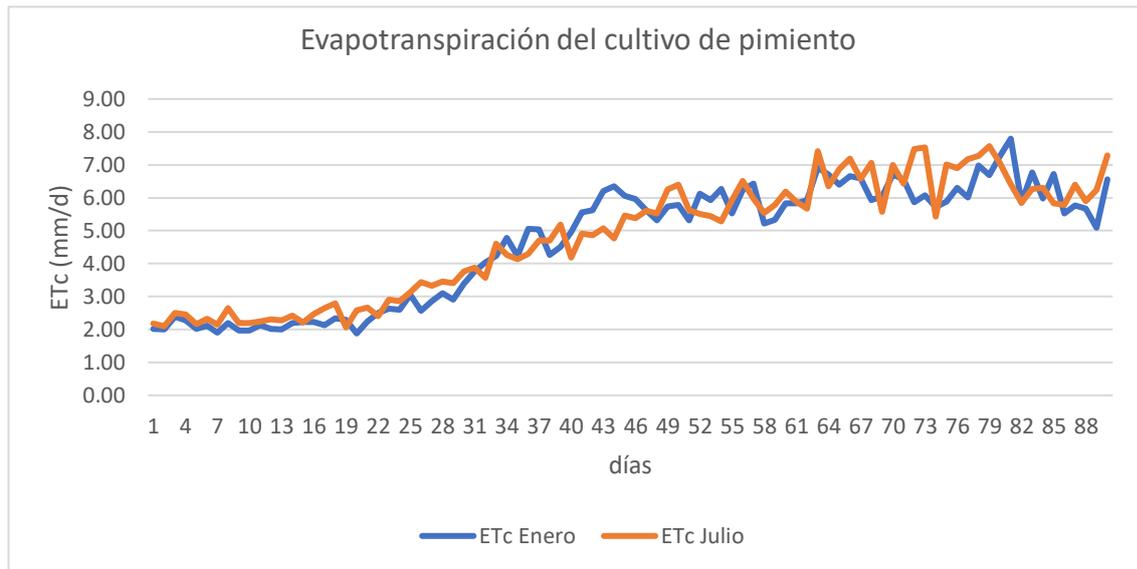
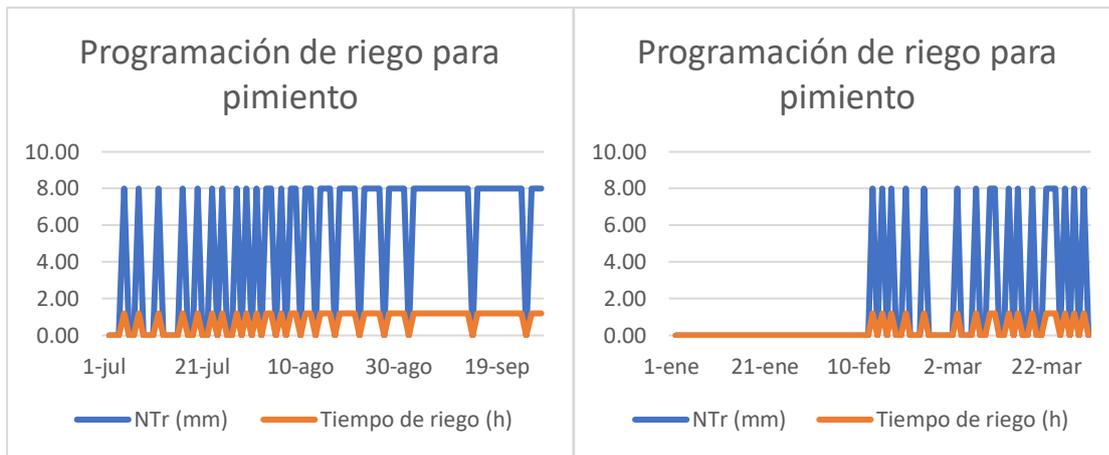


Figura 16. Evapotranspiración del cultivo de pimienta. Fuente: Elaboración propia.

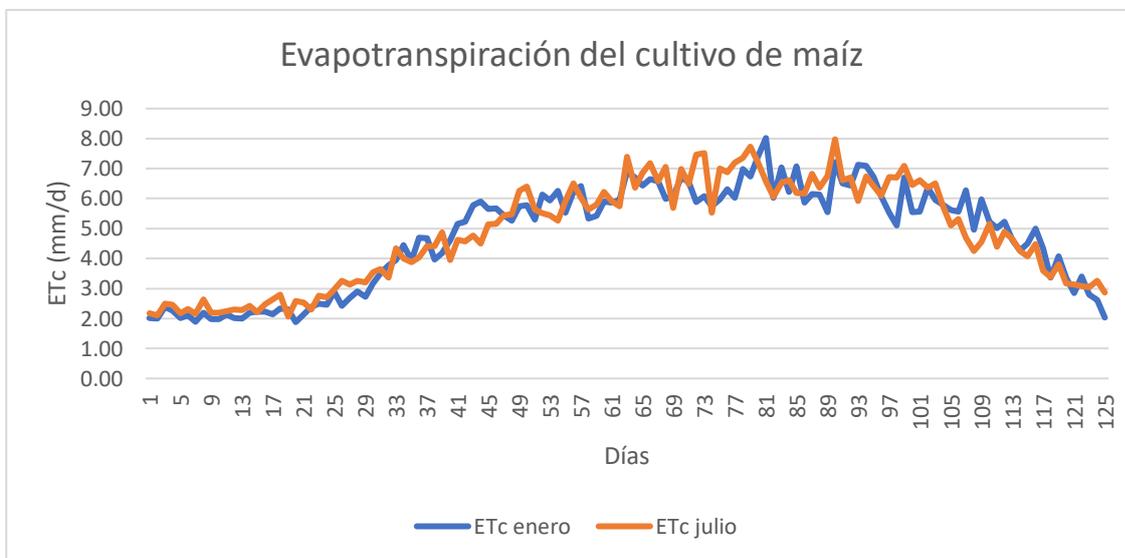
La evapotranspiración del cultivo de pimienta como se aprecia en el gráfico difiere según la época en la que se siembre. El promedio de la ETc para la siembra realizada el mes de enero es de 4,67 mm día<sup>-1</sup>, mientras que para la siembra realizada el mes de julio tiene un promedio de 4,79 mm día<sup>-1</sup>. Durante todas las fases del cultivo, la ETc es de 420,26 mm para la siembra realizada en enero y 431,51mm para la siembra realizada en julio. Los valores más bajos corresponden a una fase inicial del cultivo, mientras que los valores más altos representan la fase media y final del cultivo.

La planificación del regadío para este cultivo indica que las necesidades de riego serán de 129,60 mm si el cultivo se siembra en enero y 417,60 mm si la siembra es en julio lo que corresponde a 1.296,00 y 4.176,00 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> al año respectivamente. El pimienta al regarse con un sistema de riego por goteo tendrá una eficiencia de riego del 90,00 %, por lo tanto, las necesidades netas de agua serán de 144,00 mm (1.440 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por campaña) para la siembra realizada en enero y 464,00 mm (4.6400 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por campaña) para la siembra realizada en julio y en cada riego se aplicará una lámina fija de 8,00 mm. La siembra realizada en enero requiere menor cantidad de agua y el intervalo entre riegos es mayor, mientras que para la siembra realizada en julio requiere más agua y el intervalo entre riegos será menor.



**Figura 17. Programación de riego para el cultivo de pimienta en dos épocas de siembra.**  
Fuente: Elaboración propia.

**Cultivo de maíz:**

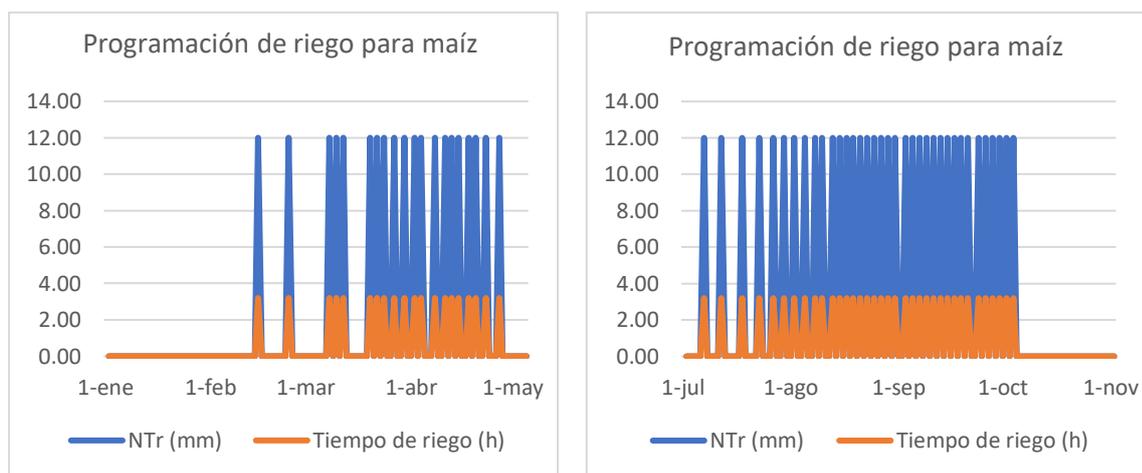


**Figura 18. Evapotranspiración del cultivo de maíz.** Fuente: Elaboración propia.

La evapotranspiración del cultivo de maíz para la época de siembra de enero fue de 594,80 mm con un promedio de 4,76 mm día<sup>-1</sup>; mientras que para la época de siembra de julio fue de 605,91 mm día<sup>-1</sup> con un promedio de 4,85 mm día<sup>-1</sup>. La ETc para ambas épocas de siembra sigue una curva que a inicio del cultivo es pequeña y va aumentando hasta la etapa media de desarrollo, y en la fase final la curva baja pues la planta de maíz debe secarse para que su mazorca esté lo suficientemente seca para ser cosechada adecuadamente.

La planificación del regadío para este cultivo indica que las necesidades de riego serán de 237,60 mm si el cultivo se siembra en enero y 590,40 mm si la siembra es en julio lo que

corresponde a 2.376,00 y 5.904,00 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por campaña respectivamente. El maíz al regarse con un sistema de riego por goteo tendrá una eficiencia de riego del 90,00 %, por lo tanto, las necesidades netas de agua serán de 264,00 mm (2.640,00 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por campaña) para la siembra realizada en enero y 656,00 mm (6.560,00 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por campaña) para la siembra realizada en julio y en cada riego se aplicará una lámina fija de 12,00 mm. La siembra realizada en enero requiere menor cantidad de agua y el intervalo entre riegos es mayor, mientras que para la siembra realizada en julio requiere más agua y el intervalo entre riegos será menor.



**Figura 19. Programación de riego para el cultivo de maíz en dos épocas de siembra.**

*Fuente: Elaboración propia.*

### **Cultivo de tomate:**

La evapotranspiración del cultivo de tomate para la época de siembra de enero fue de 583,71 mm con un promedio de 4,86 mm día<sup>-1</sup>; Mientras que para la época de siembra de julio fue de 593,25 mm, con un promedio de 4,94 mm día<sup>-1</sup>. La ETc para ambas épocas de siembra sigue una curva que a inicio del cultivo es pequeña y va aumentando hasta la etapa media de desarrollo, y en la fase final la curva baja.

La planificación del regadío para este cultivo indica que las necesidades de riego serán de 302,40 mm si el cultivo se siembra en enero y 576,00 mm si la siembra es en julio lo que corresponde a 3.024,00 y 5.760,00 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por campaña respectivamente. El tomate al regarse con un sistema de riego por goteo tendrá una eficiencia de riego del 90,00 %, por lo tanto, las necesidades netas de agua serán de 336,00 mm (3.360,00 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por campaña) para la siembra realizada en enero y 640,00 mm (6.400,00 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por campaña) para la siembra realizada en julio y en cada riego se aplicará una lámina fija de 8,00 mm. La siembra realizada en enero

requiere menor cantidad de agua y el intervalo entre riegos es mayor, mientras que para la siembra realizada en julio requiere más agua y el intervalo entre riegos será menor.

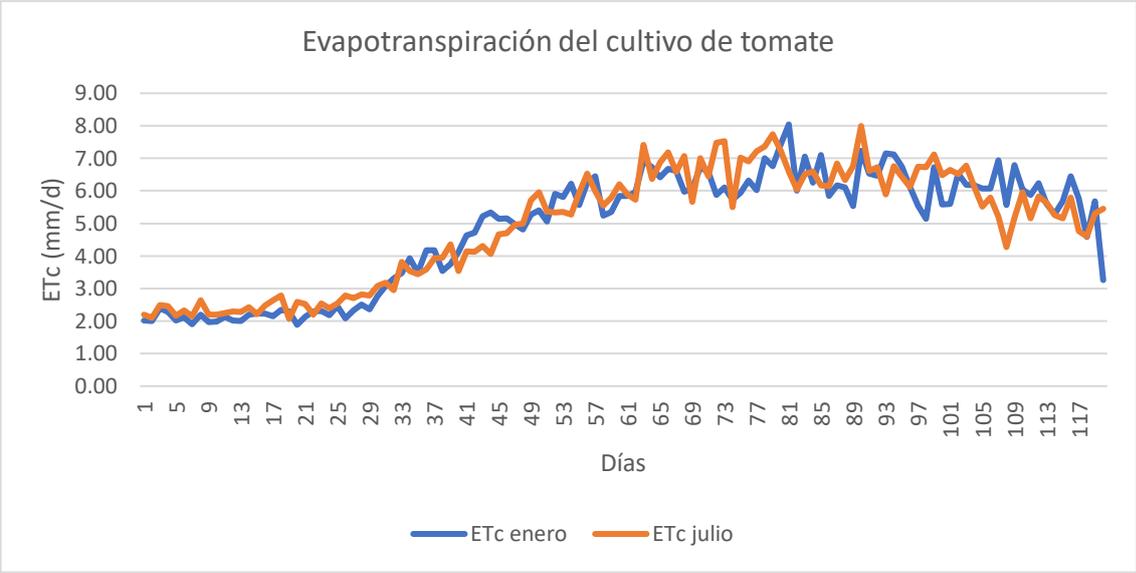


Figura 20. Evapotranspiración del cultivo de tomate. Fuente: Elaboración propia.

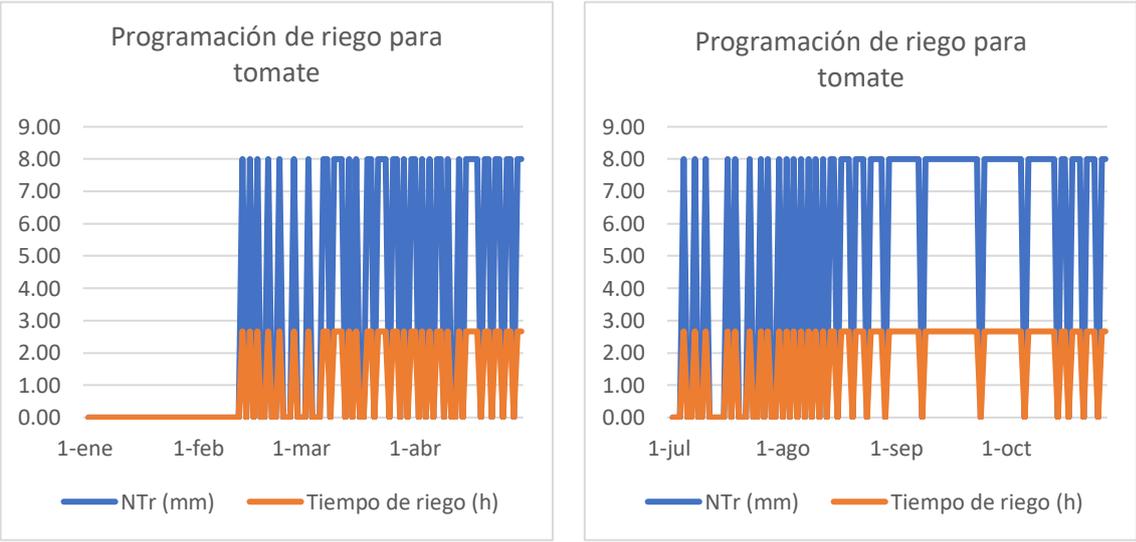


Figura 21. Programación de riego para el cultivo de tomate en dos épocas de siembra. Fuente: Elaboración propia.

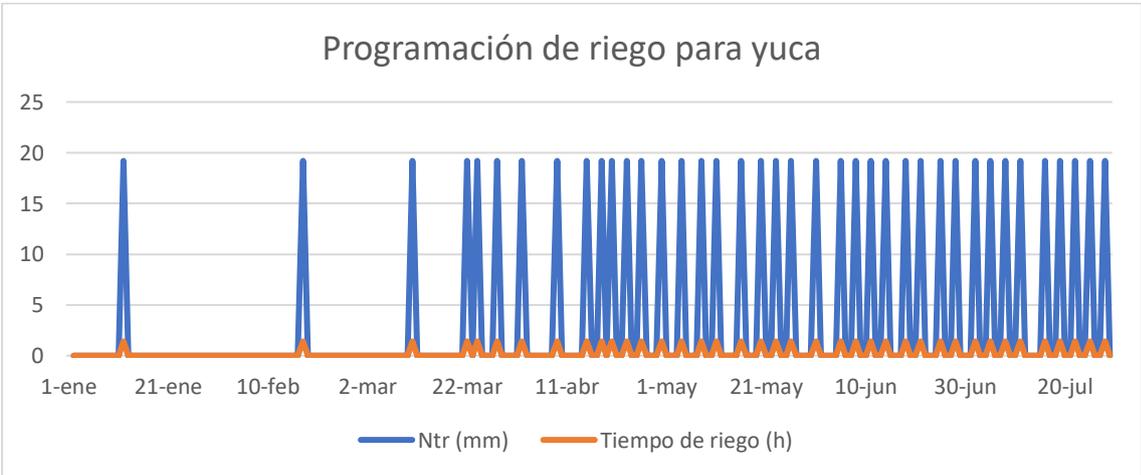
**Cultivo de yuca:**



**Figura 22. Evapotranspiración del cultivo de yuca.** Fuente: Elaboración propia.

La evapotranspiración del cultivo de yuca tiene un valor por campaña de 1148,17 mm, además, como se observa en la figura (22), presenta el valor más alto de ETc en el mes de marzo con 8,04 mm día<sup>-1</sup>. Y los valores más bajos los meses de enero, junio y julio con 3,94 y 4,16 y 4,25 mm día<sup>-1</sup> respectivamente. El promedio por campaña es de 5,49 mm día<sup>-1</sup>.

La planificación del regadío para este cultivo indica que la necesidad de riego será de 576,00 mm lo que corresponde a 5.760,00 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por campaña. La yuca al regarse con un sistema de riego por aspersión tendrá una eficiencia de riego del 75,00 %, por lo tanto, la necesidad neta de agua será de 768,00 mm o lo que es igual a 7.680,00 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por campaña y en cada riego se aplicará una lámina fija de 19,20 mm. En verano el intervalo entre riegos será menor, mientras que en la época de invierno el intervalo entre riegos será mayor.



**Figura 23. Programación de riego para el cultivo de yuca.** Fuente: Elaboración propia.

## Cultivo de maní:

La evapotranspiración del cultivo de maní para la época de siembra de enero fue de 601,76 mm con un promedio de 5,73 mm día<sup>-1</sup>; mientras que para la época de siembra de julio fue de 622,61 mm con un promedio de 5,93 mm día<sup>-1</sup>. La ETC para ambas épocas de siembra sigue una curva que empieza aproximadamente en 4,00 mm día<sup>-1</sup> y va aumentando hasta aproximarse a los 8,00 mm día<sup>-1</sup>.

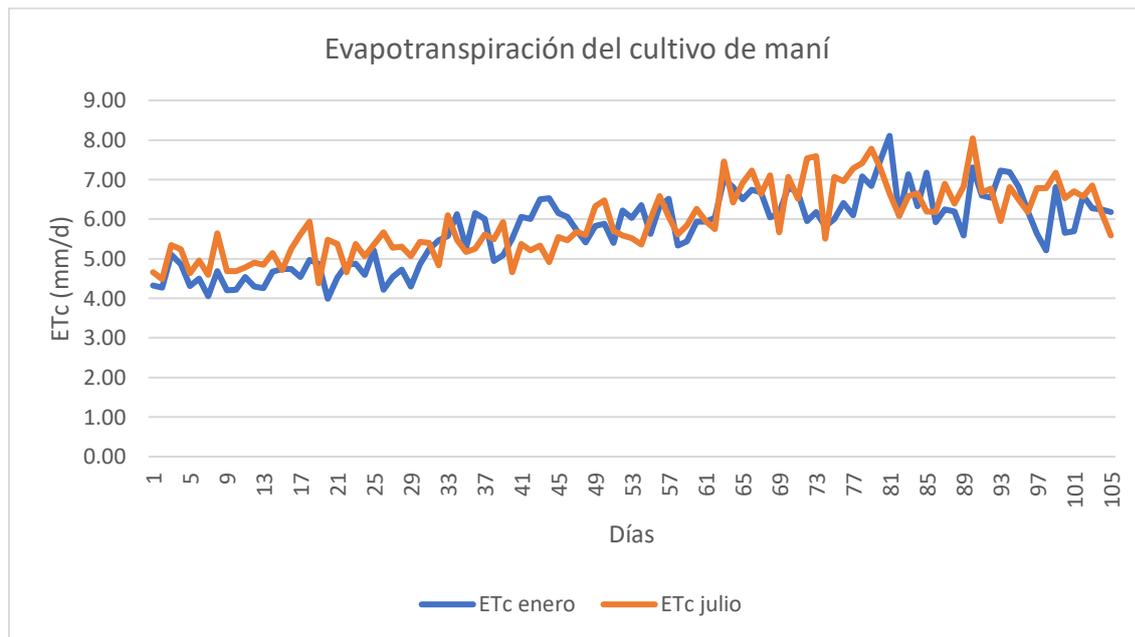
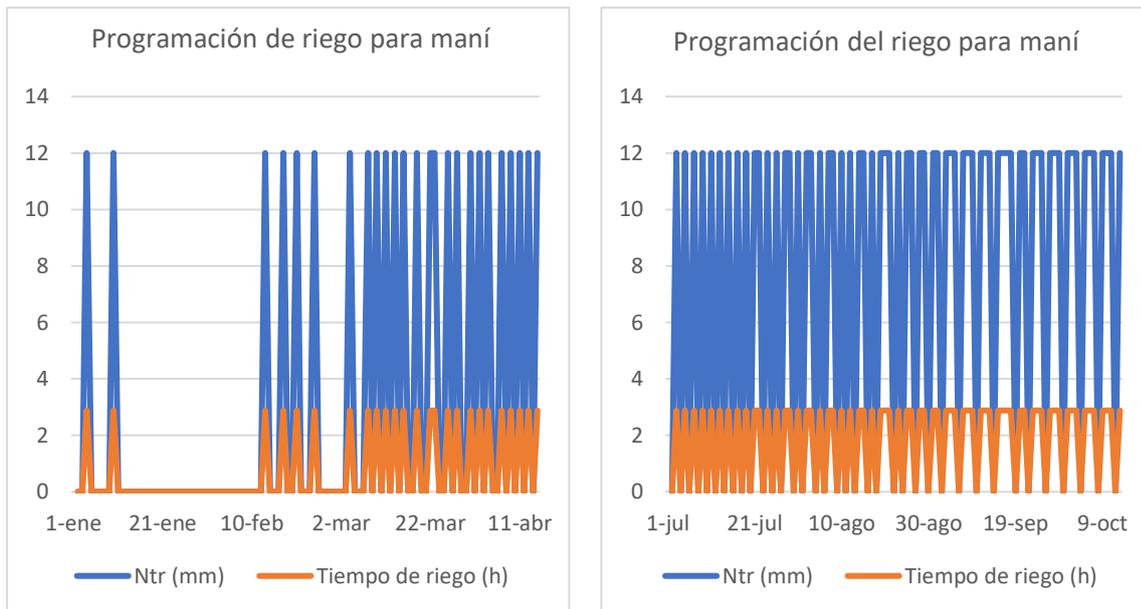


Figura 24. Evapotranspiración del cultivo de maní. Fuente: Elaboración propia.

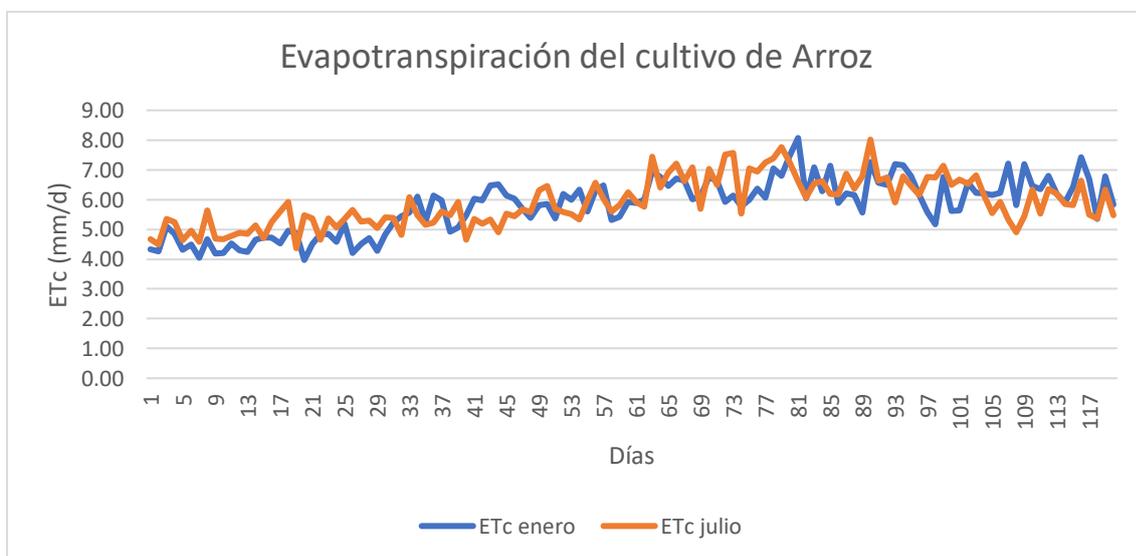
La planificación del regadío para este cultivo indica que las necesidades de riego serán de 225,00 mm si el cultivo se siembra en enero y 612,00 mm si la siembra es en julio lo que corresponde a 2.250,00 y 6.120,00 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por campaña respectivamente. El maní al regarse con un sistema de riego por aspersión tendrá una eficiencia de riego del 75,00 %, por lo tanto, las necesidades netas de agua serán de 300,00 mm (3.000,00 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por campaña) para la siembra realizada en enero y 816,00 mm (8.160,00 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por campaña) para la siembra realizada en julio y para ambas campañas, se aplicará un riego con una lámina fija de 12,00 mm. La siembra realizada en enero requiere menor cantidad de agua y el intervalo entre riegos es mayor, mientras que para la siembra realizada en julio requiere más agua y el intervalo entre riegos será menor.



**Figura 25. Programación de riego para el cultivo de maní en dos épocas de siembra.**  
Fuente: Elaboración propia.

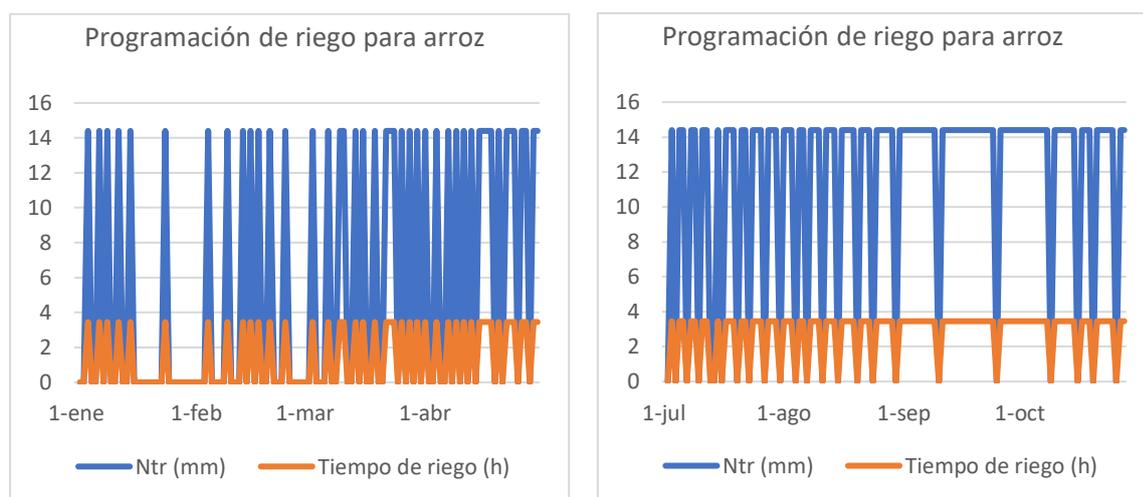
### Cultivo de arroz:

La evapotranspiración del cultivo de arroz para la época de siembra de enero fue de 695,55 mm con un promedio de 5,80 mm día<sup>-1</sup>; mientras que para la época de siembra de julio fue de 707,79 mm con un promedio de 5,90 mm día<sup>-1</sup>. La ETc para ambas épocas de siembra sigue una curva que empieza entre 4,00 y 5,00 mm día<sup>-1</sup> y va aumentando hasta aproximarse a los 8,00 mm día<sup>-1</sup> y finalmente desciende hasta los 5,00 a 6,00 mm día<sup>-1</sup>.



**Figura 26. Evapotranspiración del cultivo de arroz.** Fuente: Elaboración propia.

La planificación del regadío para este cultivo indica que las necesidades de riego serán de 316,80 mm si el cultivo se siembra en enero y 691,20 mm si la siembra es en julio lo que corresponde a 3.168,00 y 6.912,00 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por campaña respectivamente. El arroz al regarse con un sistema de riego por inundación tendrá una eficiencia de riego del 50,00 %, por lo tanto, las necesidades netas de agua serán de 633,60 mm (6.336,00 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por campaña) para la siembra realizada en enero y 1.382,40 mm (13.824,00 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> por campaña) para la siembra realizada en julio y en cada riego se aplicará una lámina fija de 14,40 mm. La siembra llevada a cabo en enero requiere menor cantidad de agua y el intervalo entre riegos es mayor, mientras que para la siembra realizada en julio requiere más agua y el intervalo entre riegos será menor.



**Figura 27. Programación de riego para el cultivo de arroz en dos épocas de siembra.**  
Fuente: Elaboración propia.

### Cultivo de pasto:

La evapotranspiración del cultivo de pasto tiene un promedio anual de 5,95 mm día<sup>-1</sup>. Los meses de mayor ETc son noviembre, septiembre, marzo y abril con 7,07, 6,89, 6,56 y 6,47 mm día<sup>-1</sup> respectivamente, mientras que los meses de menor ETc son enero y junio con 4,59 y 4,98 mm día<sup>-1</sup> respectivamente.

La planificación del regadío para este cultivo indica que la necesidad de riego será de 1.512,00 mm lo que corresponde a 15.120,00 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> al año. El pasto al regarse con un sistema de riego por aspersión tendrá una eficiencia de riego del 75,00 %, por lo tanto, la necesidad neta de agua será de 2.016,00 mm o lo que es igual a 20.160,00 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> al año y en cada riego se aplicará una lámina fija de 24,00 mm.

En verano el intervalo entre riegos será menor, mientras que en la época de invierno el intervalo entre riegos será mayor.



Figura 28. Evapotranspiración del cultivo de pasto. Fuente: Elaboración propia.

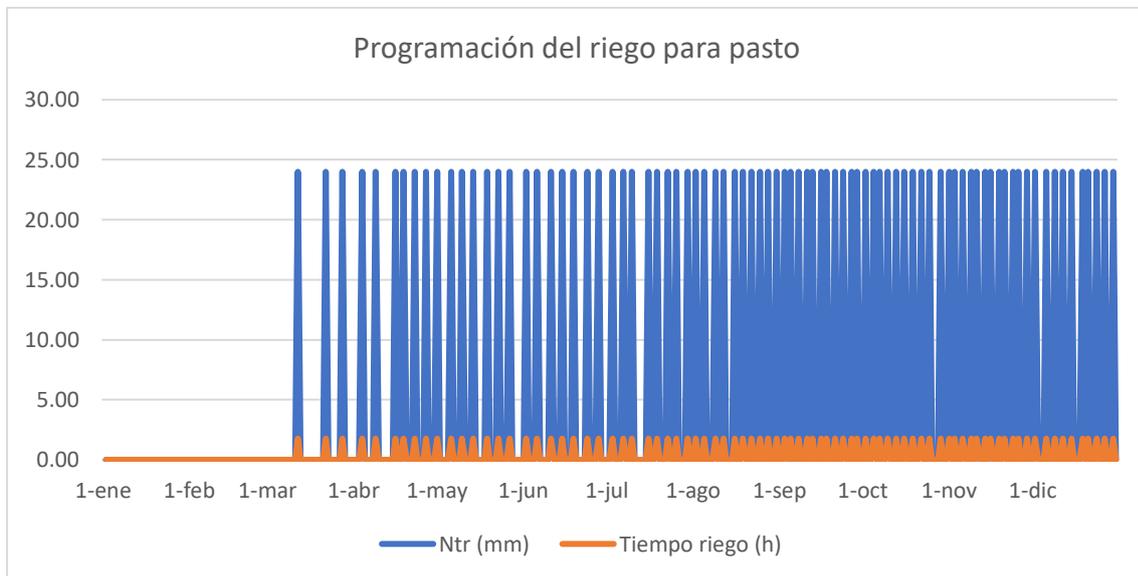
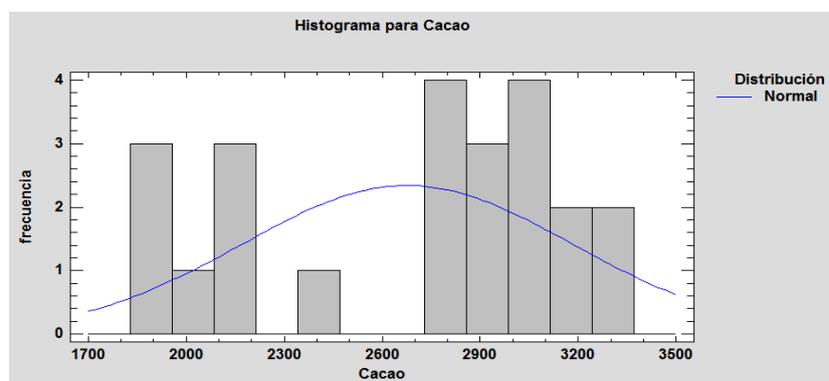


Figura 29. Programación de riego para el cultivo de pasto. Fuente: Elaboración propia.

## 4.1.2. Análisis del riesgo de la variabilidad de los precios

### Cacao:

Al realizar el análisis de distribución de los 23 precios históricos del cacao cuyo rango estaba comprendido entre 1.834,50 y 3.327,00 US\$/tm, se obtuvieron los siguientes resultados:



**Figura 30. Histograma de distribución de los precios históricos del cultivo de cacao.**  
Fuente: Software Statgraphics 2017.

Según la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov, la distribución de los precios del cacao, siguen una distribución normal con un 95,00 % de confianza.

**Tabla 5. Resumen estadístico para los precios de cacao históricos.**

Recuento	23,00
Promedio	2.677,20
Desviación Estándar	504,35
Coefficiente de Variación	18,83 %
Mínimo	1.834,50
Máximo	3.327,00
Rango	1.492,50

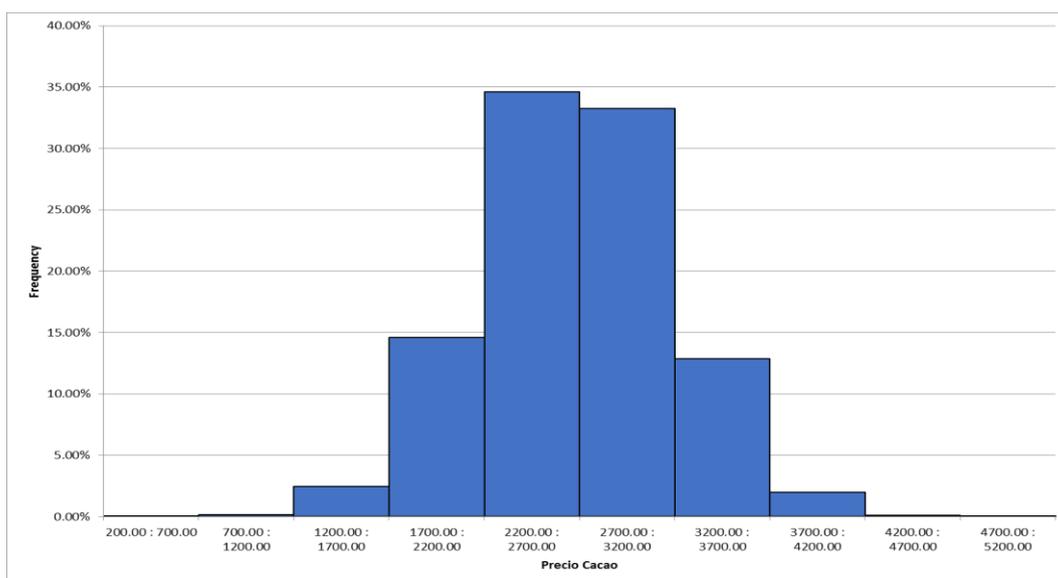
Fuente: Elaboración propia.

Al realizar la simulación con el algoritmo de Monte Carlo un millón de veces, se obtuvieron los siguientes datos de los precios del cacao:

**Tabla 6. Resumen estadístico para los precios de cacao simulados.**

Promedio	2.677,86	Percentiles	
Desviación standard	503,47	20,00 %	2.254,18
Erros standard	0,50	40,00 %	2.559,09
Máximo	5.414,89	60,00 %	2.805,94
Mínimo	399,93	80,00 %	3.102,42

Fuente: Elaboración propia.

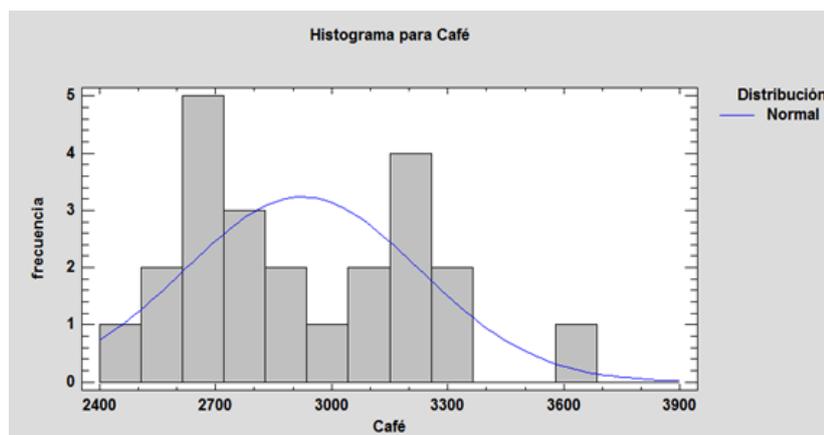


**Figura 31. Histograma de los precios simulados del cultivo de cacao. Fuente: XISim.**

El análisis del riesgo de la variabilidad de los precios de venta de los productos refleja que, el cacao tiene una probabilidad del 15,00, 35,00, 34,00 y 13,00 % de que los precios estén en un intervalo de 1.700,00 a 2.200,00, 2.200,00 a 2.700,00 (Percentil 20 y precio promedio), 2.700,00 a 3.200,00 (Percentil 80) y 3.200,00 a 3.700,00 US\$/tm respectivamente.

### Café:

Tras realizar el análisis de distribución de los 23 precios históricos del café cuyo rango estaba comprendido entre 2.778,30 y 3.611,30 US\$/tm, refleja el siguiente resultado:



**Figura 32. Histograma de distribución de los precios históricos del cultivo de café. Fuente: Software Statgraphics 2017.**

Según la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov la distribución de los precios del café siguen una distribución normal con un 95,00 % de confianza.

**Tabla 7. Resumen estadístico para los precios de café históricos.**

Recuento	23,00
Promedio	2.923,51
Desviación Estándar	303,94
Coficiente de Variación	10,39 %
Mínimo	2.478,30
Máximo	3.611,30
Rango	1.133,00

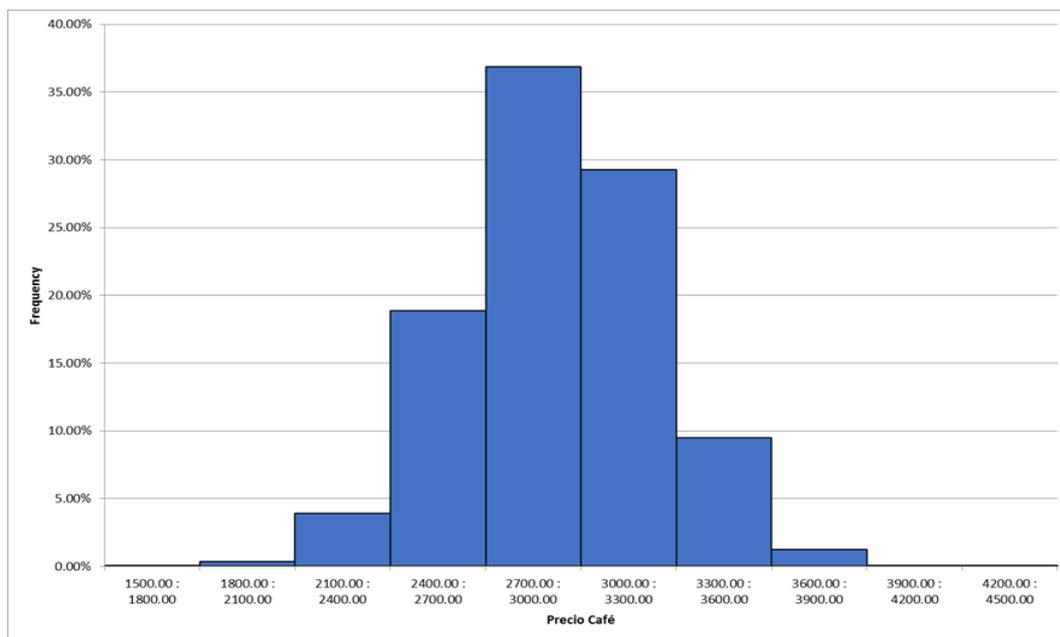
*Fuente: Elaboración propia.*

Al realizar la simulación con el algoritmo de Monte Carlo un millón de veces, se obtuvieron los siguientes datos de los precios del café:

**Tabla 8. Resumen estadístico para los precios de café simulados.**

Promedio	2.923,36	Percentiles	
Desviación standard	303,60	20,00 %	2.667,65
Erros standard	0,30	40,00 %	2.845,76
Máximo	4.350,76	60,00 %	3.000,44
Mínimo	1.454,77	80,00 %	3.179,07

*Fuente: Elaboración propia.*



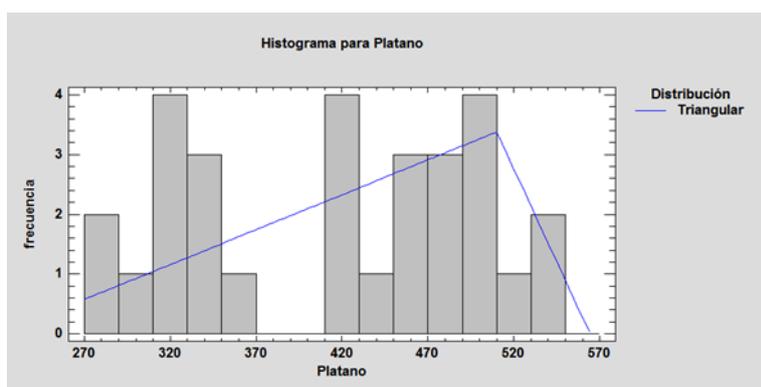
**Figura 33. Histograma de los precios simulados del cultivo de café. Fuente: XLSim**

El cultivo de café, a su vez tiene una probabilidad del 19,00, 37,00, 29,00 y 10,00 % de que los intervalos de precios de venta sean de 2.400,00 a 2.700,00 (Percentil 20), 2.700,00 a 3.000,00

(Precio promedio), 3.000,00 a 3.300,00 (Percentil 80) y de 3.300,00 a 3.600,00 US\$/tm respectivamente.

### Plátano:

Tras realizar el análisis de distribución de los 29 precios históricos del plátano cuyo rango está comprendido entre 290,00 y 550,00 US\$/tm, se obtuvieron los siguientes resultados:



**Figura 34. Histograma de distribución de precios históricos del cultivo de plátano.**  
Fuente: Software Statgraphics 2017.

Según la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov la distribución de los precios del plátano siguen una distribución triangular con un 95,00 % de confianza.

**Tabla 9. Resumen estadístico para los precios de plátano históricos.**

Recuento	29,00
Promedio	420,00
Desviación Estándar	84,76
Coefficiente de Variación	20,18 %
Mínimo	290,00
Máximo	550,00
Rango	260,00

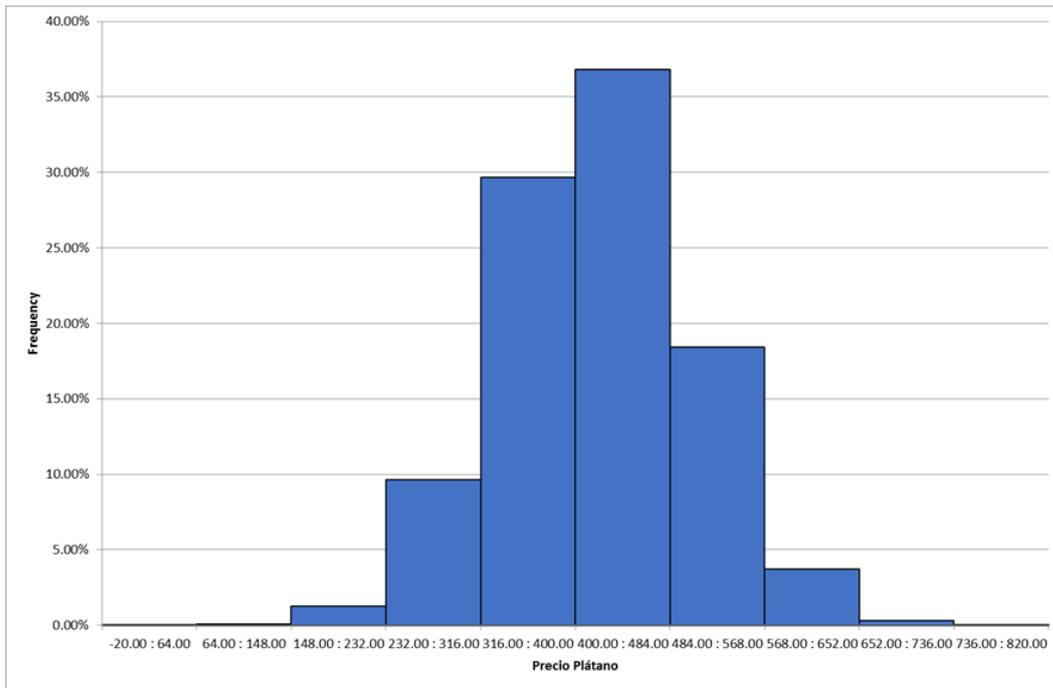
Fuente: Elaboración propia.

Al realizar la simulación con el algoritmo de Monte Carlo un millón de veces, se obtuvieron los siguientes datos de los precios del plátano:

**Tabla 10. Resumen estadístico para los precios de plátano simulados.**

Promedio	431,59	Percentiles	
Desviación standard	75,38	20,00 %	361,53
Erros standard	0,07	40,00 %	419,88
Máximo	564,35	60,00 %	464,85
Mínimo	221,04	80,00 %	502,66

Fuente: Elaboración propia.

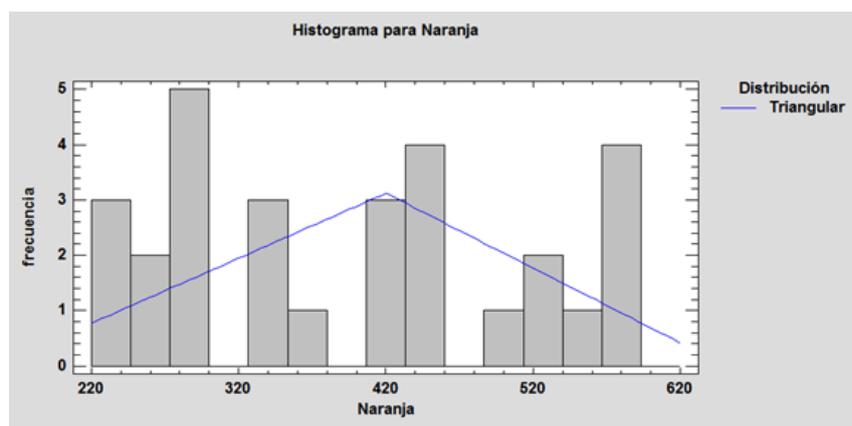


**Figura 35. Histograma de los precios simulados del cultivo de plátano.** Fuente: XISim.

Para el cultivo de plátano, se obtuvo una probabilidad del 10,00, 30,00, 37,00 y 18,00 % de que los intervalos de precios de venta sean de 232,00 a 316,00, 316,00 a 400,00 (Percentil 20), 400,00 a 484,00 (Precio promedio) y de 484,00 a 568,00 (Percentil 80) US\$/tm respectivamente.

### Naranja:

Tras realizar el análisis de distribución de los 29 precios históricos de naranja cuyo rango estaba comprendido entre 290,00 y 590,00 US\$/tm, se obtuvieron los siguientes resultados:



**Figura 36. Histograma de distribución de los precios históricos del cultivo de naranja.**

Fuente: Software Statgraphics 2017.

Según la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov la distribución de los precios de naranja siguen una distribución triangular con un 95,00 % de confianza.

**Tabla 11. Resumen estadístico para los precios de naranja históricos.**

Recuento	29,00
Promedio	400,00
Desviación Estándar	118,62
Coefficiente de Variación	29,65 %
Mínimo	240,00
Máximo	590,00
Rango	350,00

*Fuente: Elaboración propia.*

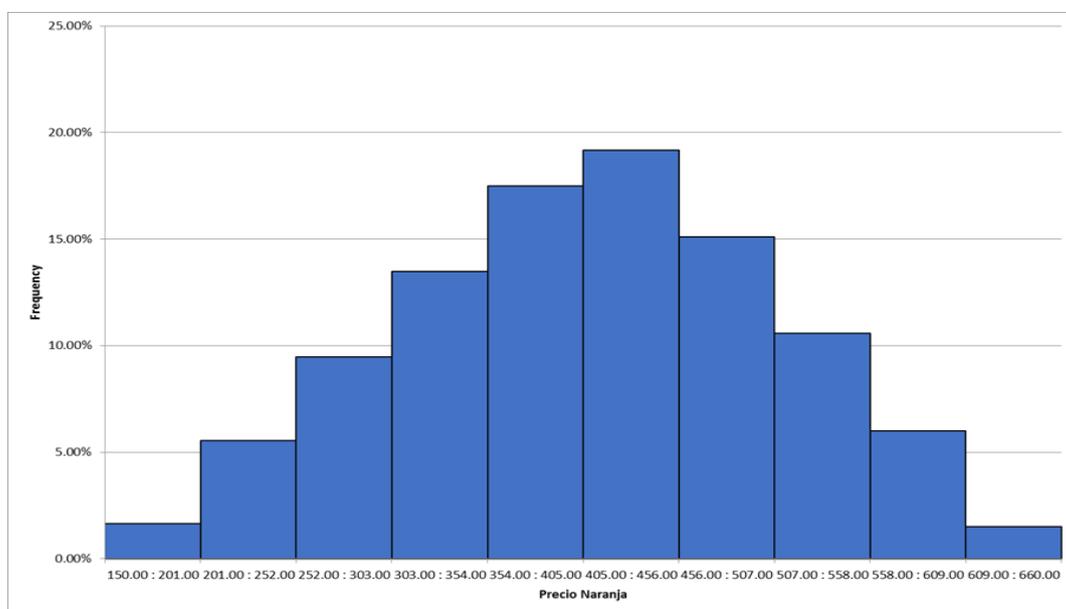
Al realizar la simulación con el algoritmo de Monte Carlo un millón de veces, se obtuvieron los siguientes datos de los precios de naranja:

**Tabla 12. Resumen estadístico para los precios de naranja simulados.**

Promedio	408,50	Percentiles	
Desviación standard	101,23	20,00 %	317,20
Erros standard	0,10	40,00 %	384,18
Máximo	650,12	60,00 %	436,77
Mínimo	154,87	80,00 %	499,29

*Fuente: Elaboración propia.*

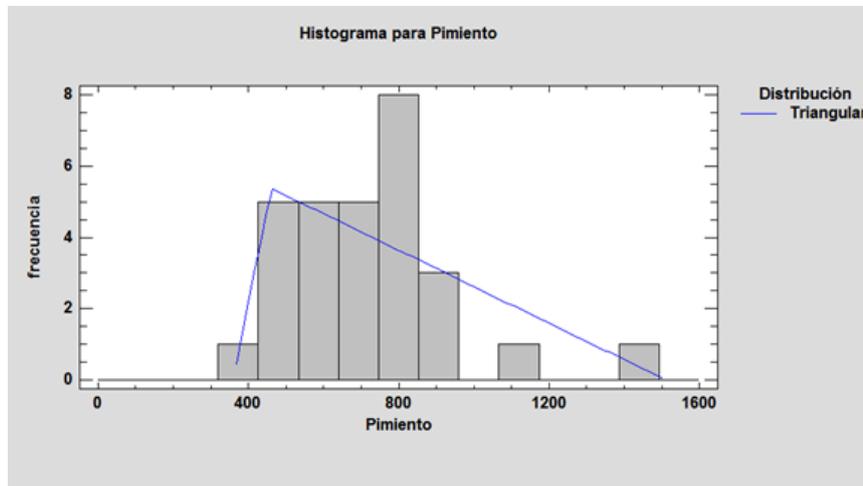
En el cultivo de naranja, se obtuvo una probabilidad del 10,00, 14,00, 17,00, 19,00, 15,00 y 11,00 % de que los precios de venta tengan intervalos de 252,00 a 303,00, 303,00 a 354,00 (Percentil 20), 354,00 a 405,00, 405,00 a 456,00 (Precio promedio), 456,00 a 507,00 (Percentil 80) y de 507,00 a 558,00 US\$/tm respectivamente.



**Figura 37. Histograma de los precios simulados del cultivo de naranja. Fuente: XISim**

## Pimiento:

Tras realizar el análisis de distribución de los 29 precios históricos del pimiento cuyo rango estaba comprendido entre 390,00 y 1.450,00 US\$/tm y los resultados obtenidos fueron los siguientes:



**Figura 38. Histograma de distribución de los precios históricos del cultivo de pimiento.**  
Fuente: Software Statgraphics 2017.

Según la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov la distribución de los precios del pimiento siguen una distribución triangular con un 95,00 % de confianza.

**Tabla 13. Resumen estadístico para los precios de pimiento históricos.**

Recuento	29,00
Promedio	720,69
Desviación Estándar	220,50
Coefficiente de Variación	30,59 %
Mínimo	390,00
Máximo	1.450,00
Rango	1.060,00

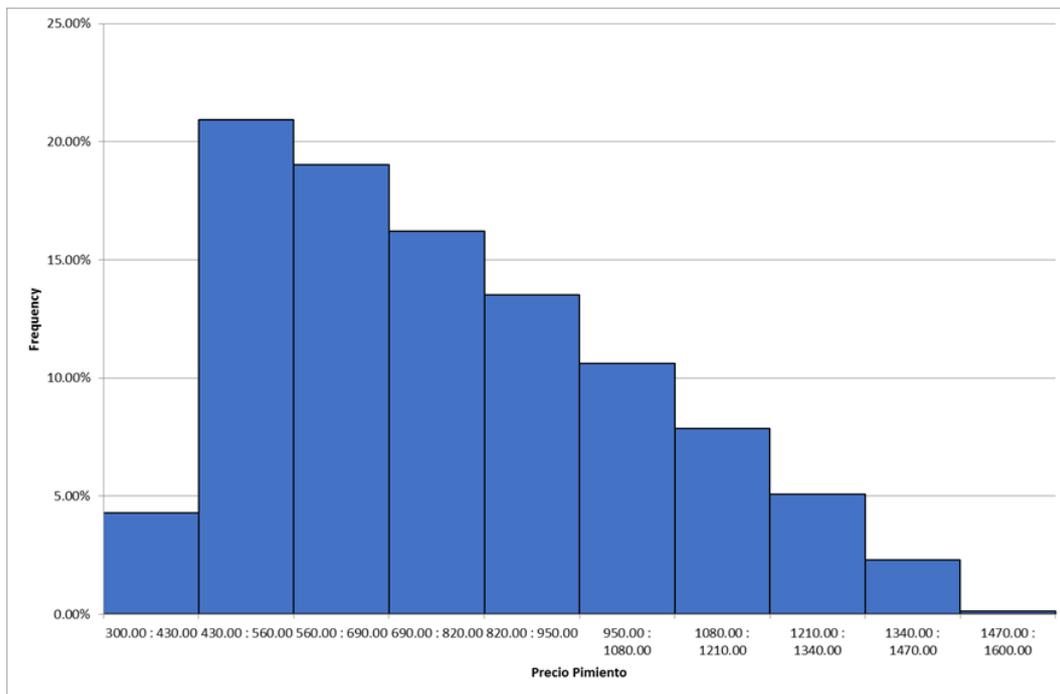
Fuente: Elaboración propia.

Al realizar la simulación con el algoritmo de Monte Carlo un millón de veces, se obtuvieron los siguientes datos de los precios del pimiento:

**Tabla 14. Resumen estadístico para los precios de pimiento simulados.**

		Percentiles	
Promedio	776,90		
Desviación standard	260,31	20,00 %	527,30
Erros standard	0,26	40,00 %	658,82
Máximo	1.509,84	60,00 %	815,39
Mínimo	359,48	80,00 %	1.019,12

Fuente: Elaboración propia

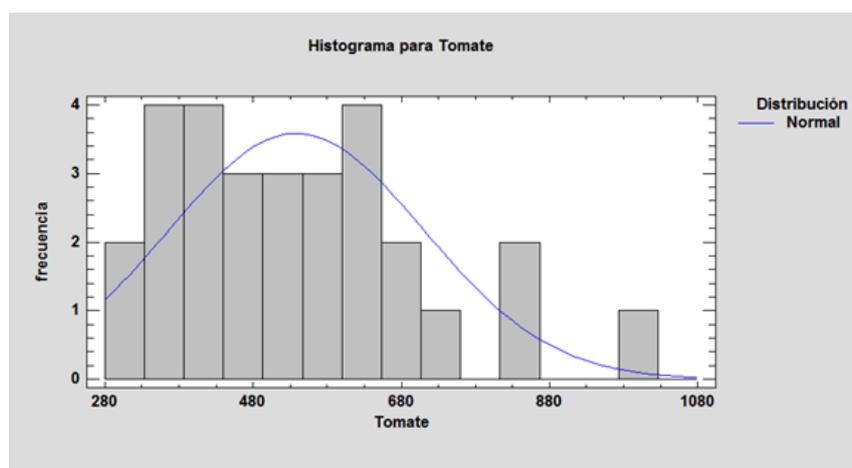


**Figura 39. Histograma de los precios simulados del cultivo de pimiento.** Fuente: XLSim.

El cultivo de pimiento tiene una probabilidad del 21,00, 19,00, 16,00, 14,00, y 11,00 % de que los precios de venta estén en el intervalo de 430,00 a 560,00 (Percentil 20), 560,00 a 690,00, 690,00 a 820,00 (Precio promedio), 820,00 a 950,00 y de 950,00 a 1080,00 (Percentil 80) US\$/tm respectivamente.

### Tomate:

Tras realizar el análisis de distribución de los 29 precios históricos del tomate cuyo rango estaba comprendido entre 317,15 y 998,75 US\$/tm, y los resultados fueron los siguientes resultados:



**Figura 40. Histograma de distribución de los precios históricos del cultivo de tomate.** Fuente: Software Statgraphics 2017.

Según la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov la distribución de los precios del tomate siguen una distribución normal con un 95,00 % de confianza.

**Tabla 15. Resumen estadístico para los precios de tomate históricos.**

Recuento	29,00
Promedio	538,36
Desviación Estándar	172,20
Coefficiente de Variación	31,98 %
Mínimo	317,15
Máximo	998,75
Rango	968,60

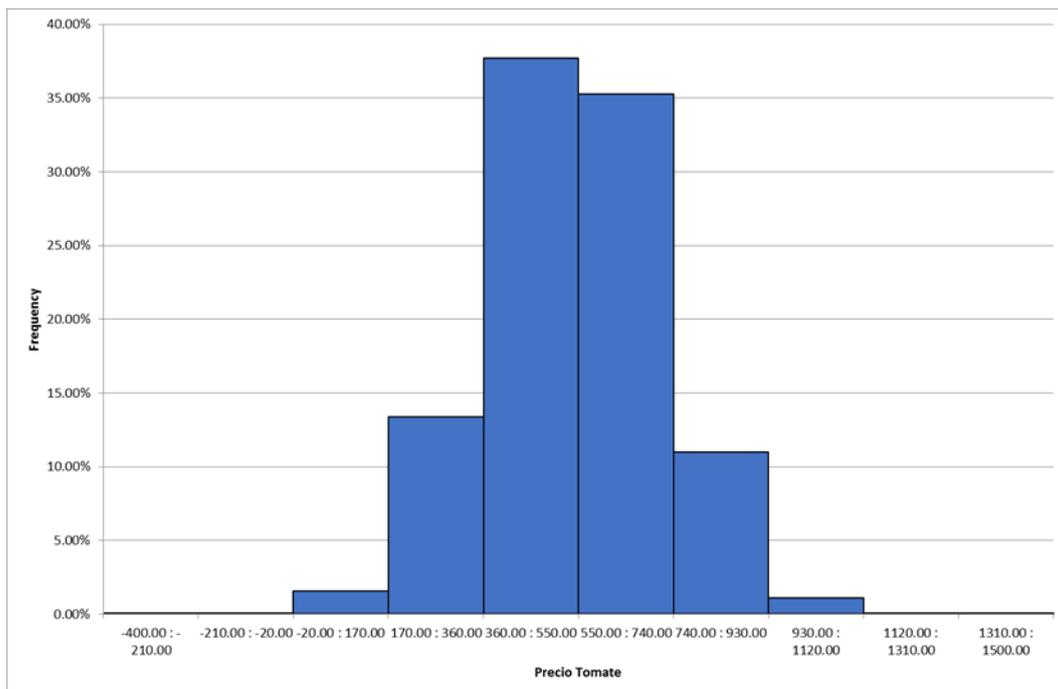
*Fuente: Elaboración propia.*

Al realizar la simulación con el algoritmo de Monte Carlo un millón de veces, se obtuvieron los siguientes datos de los precios del tomate:

**Tabla 16. Resumen estadístico para los precios de tomate simulados.**

Promedio	538,33	Percentiles	
Desviación standard	172,08	20,00 %	393,60
Erros standard	0,17	40,00 %	494,69
Máximo	1.320,62	60,00 %	581,82
Mínimo	-251,29	80,00 %	683,26

*Fuente: Elaboración propia.*

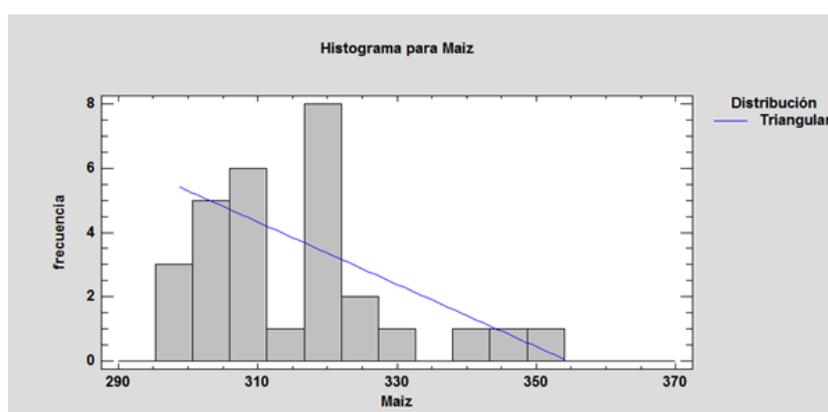


**Figura 41. Histograma de los precios simulados del cultivo de tomate. Fuente: XISim.**

Para el cultivo de tomate, se obtuvo que hay una probabilidad del 14,00, 38,00, 35,00 y 11,00 % de que los intervalos de precio de venta sean de 170,00 a 360,00, 360,00 a 550,00 (Percentil 20 y precio promedio), 550,00 a 740,00 (Percentil 80) y de 740,00 a 930,00 US\$/tm respectivamente.

### Maíz:

Tras realizar el análisis de distribución de los 29 precios históricos del maíz cuyo rango estaba comprendido entre 298,09 y 348,90 US\$/tm, se obtuvieron los siguientes resultados:



**Figura 42. Histograma de distribución de los precios históricos del cultivo de maíz.**  
Fuente: Software Statgraphics 2017.

Según la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov la distribución de los precios del maíz siguen una distribución triangular con un 95,00 % de confianza.

**Tabla 17. Resumen estadístico para los precios de maíz históricos.**

Recuento	29,00
Promedio	315,30
Desviación Estándar	13,52
Coefficiente de Variación	4,28 %
Mínimo	298,09
Máximo	348,90
Rango	50,80

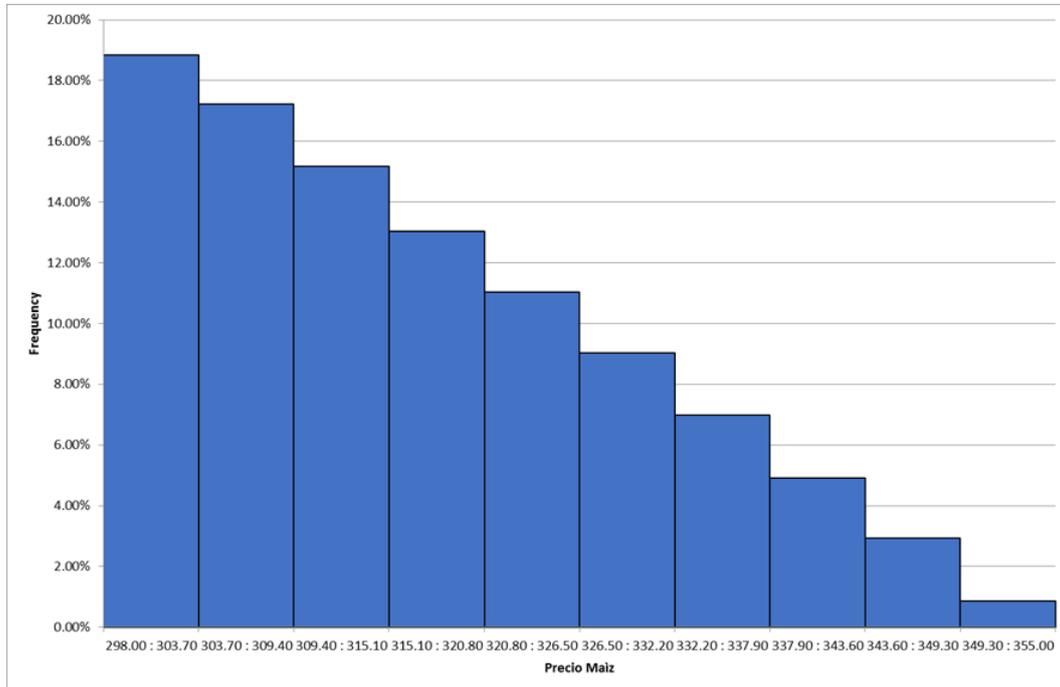
Fuente: Elaboración propia.

Al realizar la simulación con el algoritmo de Monte Carlo un millón de veces, se obtuvieron los siguientes datos de los precios de maíz:

**Tabla 18. Resumen estadístico para los precios de maíz simulados.**

Promedio	316,91	Percentiles	
Desviación standard	13,3	20,00 %	304,06
Erros standard	0,01	40,00 %	310,80
Máximo	354,52	60,00 %	318,84
Mínimo	298,09	80,00 %	329,31

Fuente: Elaboración propia.

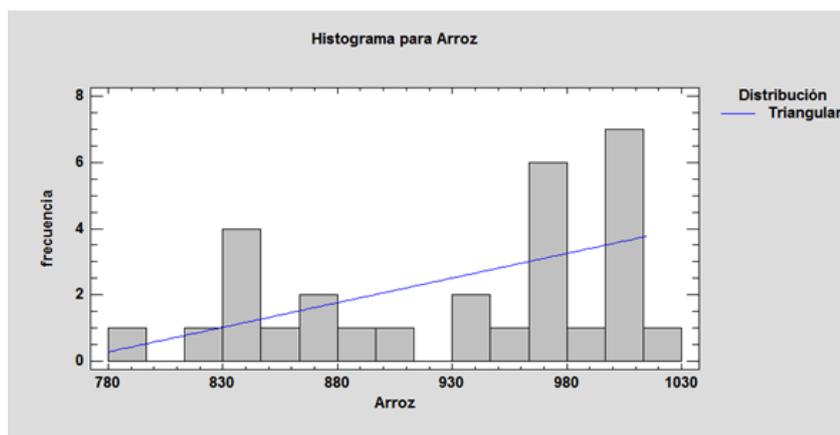


**Figura 43. Histograma de los precios simulados del cultivo de maíz.** Fuente: XLSim.

En el cultivo de maíz, se obtuvo una probabilidad del 19,00, 17,00,15,00, 13,00, 11,00 y 9,00 % de que los precios de venta estén en los intervalos de 298,00 a 303,70, 303,70 a 309,40 (Percentil 20), 309,40 a 315,10, 315,10 a 320,80 (Precio promedio), 320,80 a 326,50 y de 326,50 a 332,20 (Percentil 80) US\$/tm respectivamente.

**Arroz:**

Tras realizar el análisis de distribución de los 29 precios históricos del arroz cuyo rango estaba comprendido entre 792,00 y 1016,40 US\$/tm, y se obtuvieron los siguientes resultados:



**Figura 44. Histograma de distribución de los precios históricos del cultivo de arroz.**  
*Fuente: Software Statgraphics 2017.*

Según la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov la distribución de los precios del arroz siguen una distribución triangular con un 95,00 % de confianza.

**Tabla 19. Resumen estadístico para los precios de arroz históricos.**

Recuento	29,00
Promedio	934,69
Desviación Estándar	72,21
Coefficiente de Variación	7,72 %
Mínimo	792,00
Máximo	1.016,40
Rango	224,40

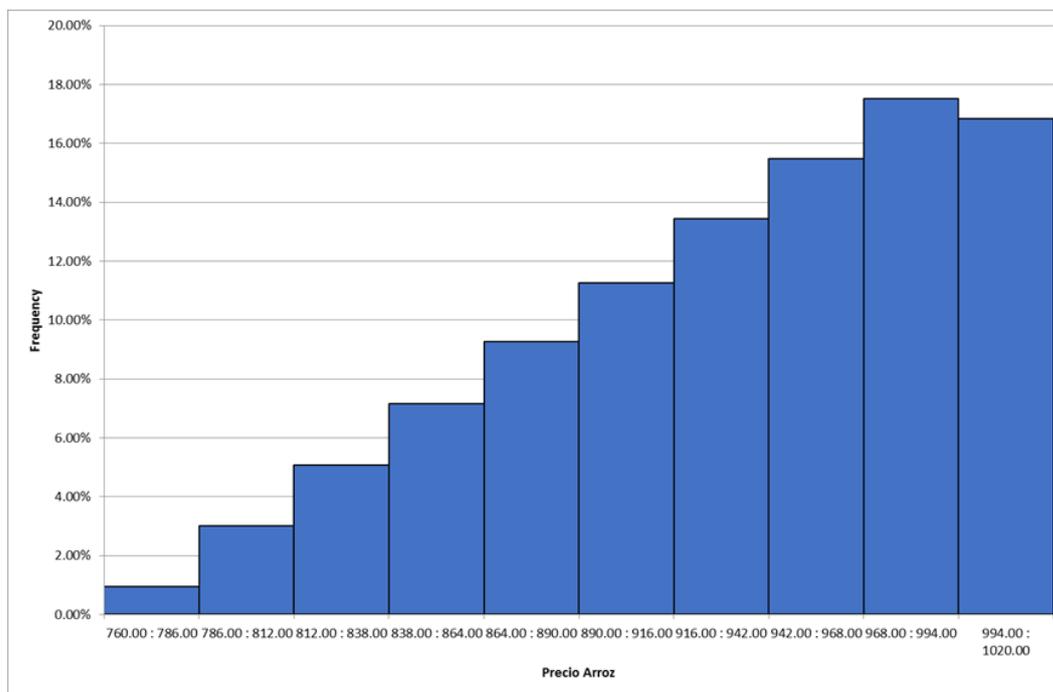
*Fuente: Elaboración propia.*

Al realizar la simulación con el algoritmo de Monte Carlo un millón de veces, se obtuvieron los siguientes datos de los precios de arroz:

**Tabla 20. Resumen estadístico para los precios de arroz simulados.**

Promedio	931,38	Percentiles	
Desviación standard	60,14	20,00 %	875,36
Error standard	0,06	40,00 %	922,65
Máximo	1.016,39	60,00 %	958,95
Mínimo	761,36	80,00 %	989,52

*Fuente: Elaboración propia,*



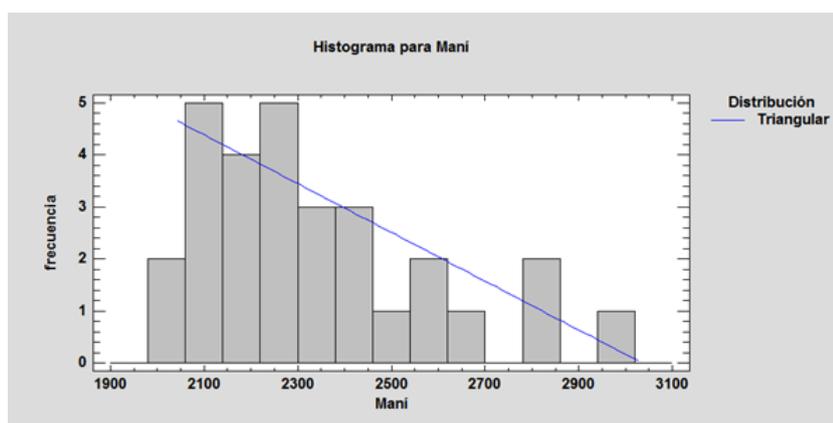
**Figura 45. Histograma de los precios simulados del cultivo de arroz.** Fuente: XISim

El cultivo de arroz tiene una probabilidad del 9,00, 11,00, 13,00, 15,00, 18,00 y 17,00 % de que los intervalos de precios de venta sean de 864,00 a 890,00 (Percentil 20), 890,00 a 916,00, 916,00 a 942,00 (Precio promedio), 942,00 a 968,00, 968,00 a 994,00 (Percentil 80) y de 994,00 a 1020,00 US\$/tm respectivamente.

### Maní:

Tras realizar el análisis de distribución de los 29 precios históricos del arroz cuyo rango está comprendido entre 2.040,00 y 2.950,00 US\$/tm, se obtuvieron los siguientes resultados:

:



**Figura 46. Histograma de distribución de los precios históricos del cultivo de maní.** Fuente: Software Statgraphics 2017.

Según la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov la distribución de los precios del maní siguen una distribución triangular con un 95,00 % de confianza.

**Tabla 21. Resumen estadístico para los precios de maní históricos.**

Recuento	29,00
Promedio	2.344,48
Desviación Estándar	245,45
Coefficiente de Variación	10,46 %
Mínimo	2.040,00
Máximo	2.950,00
Rango	910,00

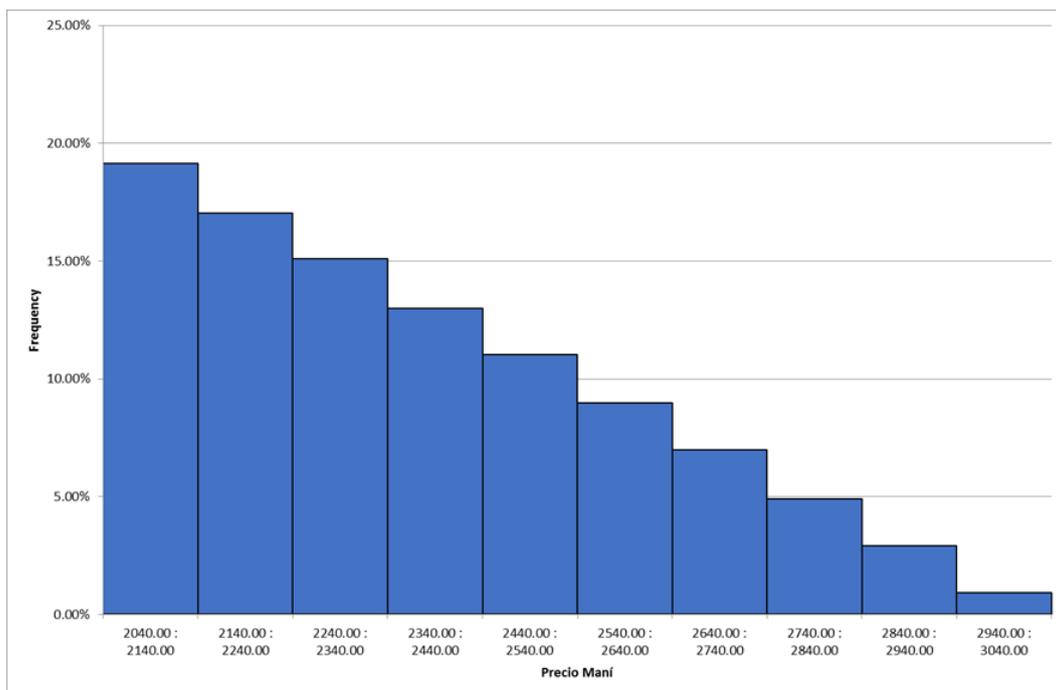
*Fuente: Elaboración propia.*

Al realizar la simulación con el algoritmo de Monte Carlo un millón de veces, se obtuvieron los siguientes datos de los precios de maní:

**Tabla 22. Resumen estadístico para los precios de maní simulados.**

Promedio	2371,35	Percentiles	
Desviación standard	234,40	20,00 %	2.144,71
Erros standard	0,23	40,00 %	2.264,13
Máximo	3.034,36	60,00 %	2.405,18
Mínimo	2.040,00	80,00 %	2.589,43

*Fuente: Elaboración propia.*

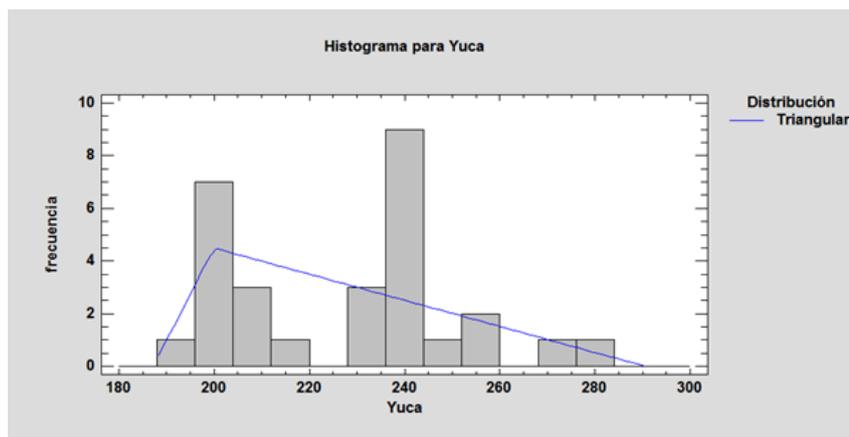


**Figura 47. Histograma de los precios simulados del cultivo de maní. Fuente: XISim**

Para el cultivo de maní, se obtuvo una probabilidad del 19,00, 17,00, 15,00 13,00, 11,00 y 9,00 % de que los intervalos de precios de venta tengan valores de 2.040,00 a 2.140,00, 2.140,00 a 2.240,00 (Percentil 20), 2.240,00 a 2.340,00, 2.340,00 a 2.440,00 (Precio promedio), 2.440,00 a 2.540,00 y de 2.540,00 a 2.640,00 (Percentil 80) US\$/tm respectivamente.

### Yuca:

Tras realizar el análisis de distribución de los 29 precios históricos de la yuca cuyo rango está comprendido entre 190,00 y 280,00 US\$/tm, se obtuvieron los siguientes resultados:



**Figura 48. Histograma de distribución de precios históricos del cultivo de yuca**  
Fuente: Software Statgraphics 2017.

Según la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov la distribución de los precios de la yuca siguen una distribución triangular con un 95,00% de confianza.

**Tabla 23. Resumen estadístico para los precios de la yuca históricos.**

Recuento	29,00
Promedio	227,93
Desviación Estándar	24,10
Coficiente de Variación	10,57 %
Mínimo	190,00
Máximo	280,00
Rango	90,00

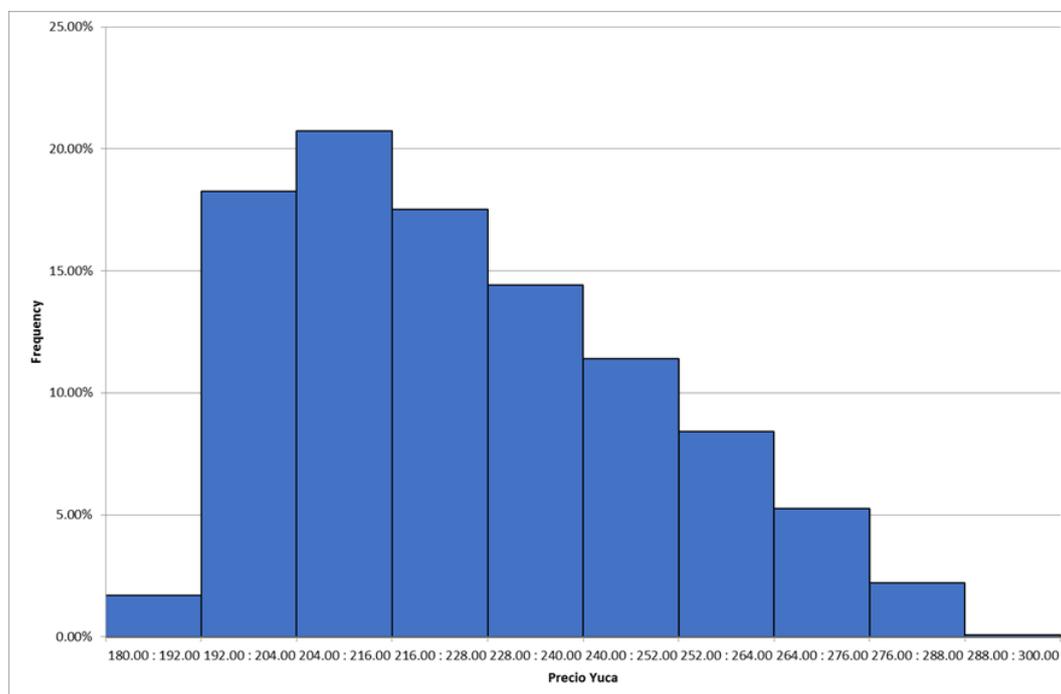
Fuente: Elaboración propia.

Al realizar la simulación con el algoritmo de Monte Carlo un millón de veces, se obtuvieron los siguientes datos de los precios de la yuca:

**Tabla 24 . Resumen estadístico para los precios de la yuca simulados.**

Promedio	225,91	Percentiles	
Desviación standard	23,02	20,00 %	204,02
Erros standard	0,02	40,00 %	215,55
Máximo	290,46	60,00 %	229,35
Mínimo	187,22	80,00 %	247,34

*Fuente: Elaboración propia.*



**Figura 49. Histograma de los precios simulados del cultivo de yuca.** Fuente: XISim.

El cultivo de yuca obtuvo como resultado una probabilidad del 18,00, 21,00, 17,00, 14,00 y 11,00 % de que los intervalos de precio de venta del cultivo sean de 192,00 a 204,00, 204,00 a 216,00 (Percentil 20), 216,00 a 228,00 (Precio promedio), 228,00 a 240,00 y de 240,00 a 252,00 (Percentil 80) US\$/tm respectivamente.

**Pasto:**

El cultivo de pasto tiene un costo de producción referencial de 300,00 US\$/ha, y un precio estimado de venta de 40,00 US\$/tm. Para este cultivo no se encuentran datos históricos de precios, debido a que el pasto de la zona no tiene un valor comercial, sino que es exclusivamente empleado para el pastoreo del ganado.

### 4.1.3. Modelo de optimización económica

#### Necesidades totales de riego según la fracción de reducción en la producción:

Al aplicar la ecuación de Doorenbos y Kassam para cada uno de los cultivos, se observó que para que la producción no tenga ninguna disminución se debe aplicar el 100,00 % de las necesidades totales de riego; donde se aprecia que cultivos como el café, cacao, pasto, plátano, naranja y arroz son cultivos que demandan grandes cantidades de agua, mientras que cultivos como el pimiento, tomate, maíz, yuca y maní tienen requerimientos bastante menores. Mientras que, cuando se aplica riego deficitario y se pretende obtener como mínimo el 70,00 % de la producción, las necesidades de riego de los cultivos disminuyen, como en el caso del cacao que el volumen de agua se reduce a casi la mitad, el cultivo de plátano se reduce un 25,00 %; todo depende de la sensibilidad que presenta cada cultivo al aplicar riego deficitario.

Tabla 25. Necesidades totales de riego y fracción de reducción en la producción.

		Fracción de reducción en la producción			
		ya/ym	1.0	0.9	0.8
Necesidades totales de riego (mm)	Cacao	1944,00	1800,00	1632,00	1128,00
	Naranja	1610,67	1493,33	1365,33	1205,33
	Café	2112,00	1944,00	1764,00	1248,00
	Plátano	2099,20	1945,60	1702,40	1510,40
	Pimiento	464,00	424,00	400,00	368,00
	Maíz	648,00	600,00	528,00	432,00
	Tomate	640,00	632,00	592,00	560,00
	Yuca	768,00	652,80	556,80	422,40
	Maní	816,00	792,00	744,00	684,00
	Arroz	1382,40	1310,00	1166,40	993,60
	Pasto	2016,00	1848,00	1704,00	1536,00

Fuente: Elaboración propia.

#### Función agua-rendimiento y agua-margen bruto:

Para obtener estas funciones, se emplearon los datos anteriormente obtenidos de la necesidad neta de riego según la fracción de reducción del rendimiento. Para el modelo de optimización económica, se han evaluado 3 escenarios en lo referente a los precios de venta de los productos; por lo que, el escenario 1 corresponde el precio de venta del percentil 80, el escenario 2, corresponde al precio de venta promedio y, el escenario 3, corresponde al precio de venta del

percentil 20. De esta manera, se contempló el riesgo de la variabilidad de los precios de venta de los productos, al momento de tomar decisiones referentes a cuánta superficie se debe sembrar y cuánta agua asignar a los diferentes cultivos.

**Tabla 26. Margen-bruto en función de la fracción del rendimiento esperado para el cultivo de cacao y naranja.**

Fracción del rendimiento esperado (Ya/Ym)	Cacao				Naranja			
	Producción (Tm/ha)	Margen Bruto (\$/ha)			Producción (Tm/ha)	Margen Bruto (\$/ha)		
		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
1,00	2,00	3504,84	2655,72	1808,36	12,00	4062,64	2973,16	1877,56
0,90	1,80	2956,35	2192,14	1429,52	10,80	3522,16	2541,63	1555,59
0,80	1,60	2419,87	1740,57	1062,68	9,60	2987,01	2115,43	1238,95
0,70	1,40	2051,38	1457,00	863,85	8,40	2467,87	1705,23	938,31
		Precios de venta (\$/Tm)				Precios de venta (\$/Tm)		
		3102,42	2677,86	2254,18		499,29	408,50	317,20
		Costo de producción (\$/ha)				Costo de producción (\$/ha)		
		1728,00				1123,50		

Fuente: Elaboración propia.

El cultivo de cacao tiene un costo de producción de 1.728,00 US\$/ha. Presenta un rendimiento de 2,00 tm/ha cuando se le asigna el 100,00 % de agua y, bajo el escenario 1, con un precio de venta de 3.102,42 US\$/tm, tiene un margen-bruto máximo de 3.504,84 US\$/ha, mientras que el margen-bruto mínimo para este cultivo es de 863,85 US\$/ha, que se alcanza cuando el precio de venta del cacao tiene un valor de 317,20 US\$/tm y la fracción del rendimiento esperado es de 0,70, consiguiendo una producción de 1,40 tm/ha.

Por otra parte, el cultivo de naranja tiene un costo de producción de 1.123,5 US\$/ha. Su producción máxima llega a 12,00 tm/ha, y de esta forma cuando el precio de venta es de 499,29 US\$/tm se alcanza un margen-bruto máximo de 4.062,65 US\$/ha. El margen-bruto mínimo es de 938,32 US\$/ha cuando la fracción de rendimiento esperado es de 0,70 y el precio de venta de la naranja es de 317,20 US\$/tm.

**Tabla 27. Margen-bruto en función de la fracción del rendimiento esperado para el cultivo de café y plátano.**

Fracción del rendimiento esperado (Ya/Ym)	Café				Plátano			
	Producción (Tm/ha)	Margen Bruto (\$/ha)			Producción (Tm/ha)	Margen Bruto (\$/ha)		
		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
1,00	1,00	1191,57	935,86	680,15	10,00	2428,60	1717,90	1017,30
0,90	0,90	957,66	727,52	497,38	9,00	2009,94	1370,31	739,77
0,80	0,80	729,75	525,18	320,62	8,00	1597,28	1028,72	468,24
0,70	0,70	669,84	490,85	311,85	7,00	1352,62	855,13	364,71
		Precios de venta (\$/Tm)				Precios de venta (\$/Tm)		
		3179,07	2923,36	2667,65		502,66	431,59	361,53
		Costo de producción (\$/ha)				Costo de producción (\$/ha)		
		931,50				1542,00		

Fuente: Elaboración propia.

El cultivo de café tiene un costo de producción de 931,50 US\$/ha. Presenta un rendimiento de 1,00 tm/ha cuando se le asigna el 100,00 % del requerimiento de agua y, bajo el escenario 1, con un precio de venta de 3.179,07 US\$/tm, tiene un margen-bruto máximo de 1.191,57 US\$/ha, mientras que el margen-bruto mínimo para este cultivo es de 311,85 US\$/ha, que se alcanza cuando el precio de venta es de 361,53 US\$/tm y la fracción del rendimiento esperado es de 0,70, consiguiendo una producción de 0,70 tm/ha.

Por otra parte, el cultivo de plátano tiene un costo de producción de 1.542,00 US\$/ha. Su producción máxima llega a 10,00 tm/ha, y de esta forma cuando el precio de venta es de 502,66 US\$/tm se alcanza un margen-bruto máximo de 2.428,60 US\$/ha. El margen-bruto mínimo es de 364,71 US\$/ha cuando la fracción de rendimiento esperado es de 0,70 y el precio de venta del plátano es de 361,53 US\$/tm.

**Tabla 28. Margen-bruto en función de la fracción de rendimiento esperado para los cultivos de pimiento y tomate.**

Fracción del rendimiento esperado (Ya/Ym)	Pimiento				Tomate			
	Producción (Tm/ha)	Margen Bruto (\$/ha)			Producción (Tm/ha)	Margen Bruto (\$/ha)		
		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
1,00	16,00	10453,92	6578,40	2584,80	20,00	7075,40	4176,60	1282,00
0,90	14,40	8843,32	5355,36	1761,12	18,00	5712,86	3103,94	498,80
0,80	12,80	7224,73	4124,32	929,44	16,00	4366,32	2047,28	-268,40
0,70	11,20	5610,14	2897,28	101,75	14,00	3015,78	986,62	-1039,60
		Precios de venta (\$/Tm)				Precios de venta (\$/Tm)		
		1019,12	776,90	527,30		683,27	538,33	393,60
		Costo de producción (\$/ha)				Costo de producción (\$/ha)		
		5620,00				6270,00		

Fuente: Elaboración propia.

El cultivo de pimiento tiene un costo de producción de 5.620,00 US\$/ha. Presenta un rendimiento de 16,00 tm/ha cuando se le asigna el 100,00 % de agua y, bajo el escenario 1, con un precio de venta de 1.019,12 US\$/tm, tiene un margen-bruto máximo de 10.453,92 US\$/ha, mientras que el margen-bruto mínimo para este cultivo es de 101,76 US\$/ha, y se alcanza cuando la fracción del rendimiento esperado es de 0,70, consiguiendo una producción de 11,2 tm/ha, y el precio de venta tiene un valor de 527,30 US\$/tm.

El cultivo de tomate tiene un costo de producción de 6.270,00 US\$/ha. Su producción máxima llega a 20,00 tm/ha, y de esta forma cuando el precio de venta es de 683,27 US\$/tm se alcanza un margen-bruto máximo de 7.075,40 US\$/ha. El margen-bruto mínimo llega a valores negativos de -1.039,60 US\$/ha cuando la fracción de rendimiento esperado es de 0,70 y el precio de venta es de 393,60 US\$/tm.

**Tabla 29. Margen-bruto en función de la fracción del rendimiento esperado para los cultivos de maíz y yuca.**

Fracción del rendimiento esperado (Ya/Ym)	Maíz				Yuca			
	Producción (Tm/ha)	Margen Bruto (\$/ha)			Producción (Tm/ha)	Margen Bruto (\$/ha)		
		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
1,00	9,00	1504,79	1393,19	1277,54	15,00	2324,60	2003,15	1674,80
0,90	8,10	1232,41	1131,97	1027,88	13,50	2011,19	1721,88	1426,37
0,80	7,20	972,03	882,75	790,23	12,00	1688,18	1431,02	1168,34
0,70	6,30	723,65	645,53	564,57	10,50	1384,37	1159,35	929,51
		Precios de venta (\$/Tm)				Precios de venta (\$/Tm)		
		329,31	316,91	304,06		247,34	225,91	204,02
		Costo de producción (\$/ha)				Costo de producción (\$/ha)		
		1135,00				1001,50		

Fuente: Elaboración propia.

El cultivo de maíz presenta un costo de producción de 1.135,00 US\$/ha. Tiene un rendimiento de 9,00 tm/ha cuando se le asigna el 100,00 % de agua y, bajo el escenario 1, con un precio de venta de 329,31 US\$/tm, tiene un margen-bruto máximo de 1.504,79 US\$/ha, mientras que el margen-bruto mínimo para este cultivo es de 564,57 US\$/ha, y se alcanza cuando la fracción del rendimiento esperado es de 0,70, consiguiendo una producción de 6,30 tm/ha, y el precio de venta tiene un valor de 304,06 US\$/tm.

El cultivo de yuca tiene un costo de producción de 1.001,50 US\$/ha. Su producción máxima llega a 15,00 tm/ha, y de esta forma cuando el precio de venta es de 247,34 US\$/tm se alcanza un margen-bruto máximo de 2.324,60 US\$/ha. El margen-bruto mínimo tiene un valor de 929,51 US\$/ha cuando la fracción de rendimiento esperado es de 0,70 y el precio de venta es de 204,02 US\$/tm.

*Tabla 30. Margen-bruto en función de la fracción del rendimiento para los cultivos de maní y arroz.*

Fracción del rendimiento esperado (Ya/Ym)	Maní				Arroz			
	Producción (Tm/ha)	Margen Bruto (\$/ha)			Producción (Tm/ha)	Margen Bruto (\$/ha)		
		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
1,00	2,00	3611,38	3175,20	2721,92	4,50	2320,64	2059,01	1806,92
0,90	1,80	3105,49	2712,93	2304,97	4,05	1911,55	1676,08	1449,20
0,80	1,60	2611,60	2262,66	1900,03	3,60	1538,07	1328,76	1127,09
0,70	1,40	2123,71	1818,39	1501,09	3,15	1179,18	996,04	819,58
		Precios de venta (\$/Tm)				Precios de venta (\$/Tm)		
		2589,44	2371,35	2144,71		989,52	931,38	875,36
		Costo de producción (\$/ha)				Costo de producción (\$/ha)		
		1159,50				1441,00		

*Fuente: Elaboración propia.*

El cultivo de maní tiene un costo de producción de 1.159,50 US\$/ha. Presenta un rendimiento de 2,00 tm/ha cuando se le asigna el 100,00 % de agua y, con un precio de venta de 2.589,44 US\$/tm, tiene un margen-bruto máximo de 3.611,38 US\$/ha, mientras que el margen-bruto mínimo para este cultivo es de 1.501,09 US\$/ha, que se alcanza cuando el precio de venta del maní tiene un valor de 2.144,71 US\$/tm y la fracción del rendimiento esperado es de 0,70, consiguiendo una producción de 1,40 tm/ha.

Por otra parte, el cultivo de arroz tiene un costo de producción de 1.441,00 US\$/ha. Su producción máxima llega a 4,50 tm/ha, y de esta forma cuando el precio de venta es de 989,52 US\$/tm se alcanza un margen-bruto máximo de 2.320,54 US\$/ha. El margen-bruto mínimo es de 819,58 US\$/ha cuando la fracción de rendimiento esperado es de 0,70 y el precio de venta de la naranja es de 875,36 US\$/tm.

Tabla 31. Margen-bruto en función de la fracción del rendimiento esperado para el cultivo de pasto.

Fracción del rendimiento esperado (Ya/Ym)	Pasto		Precios de venta (\$/Tm)
	Producción (Tm/ha)	Margen Bruto (\$/ha)	
1,00	40,00	292,00	40,00
0,90	36,00	216,00	Costo de producción (\$/ha)
0,80	32,00	128,00	
0,70	28,00	52,00	300,00

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, el cultivo de pasto tiene un costo de producción de 300,00 US\$/ha, y una producción máxima de 40,00 tm/ha. El pasto tiene un precio de venta estimado en 40,00 US\$/tm; de esta manera el margen bruto máximo tiene un valor de 292,00 y mínimo de 52,00 US\$/ha

### Función agua-margen bruto para cada escenario:

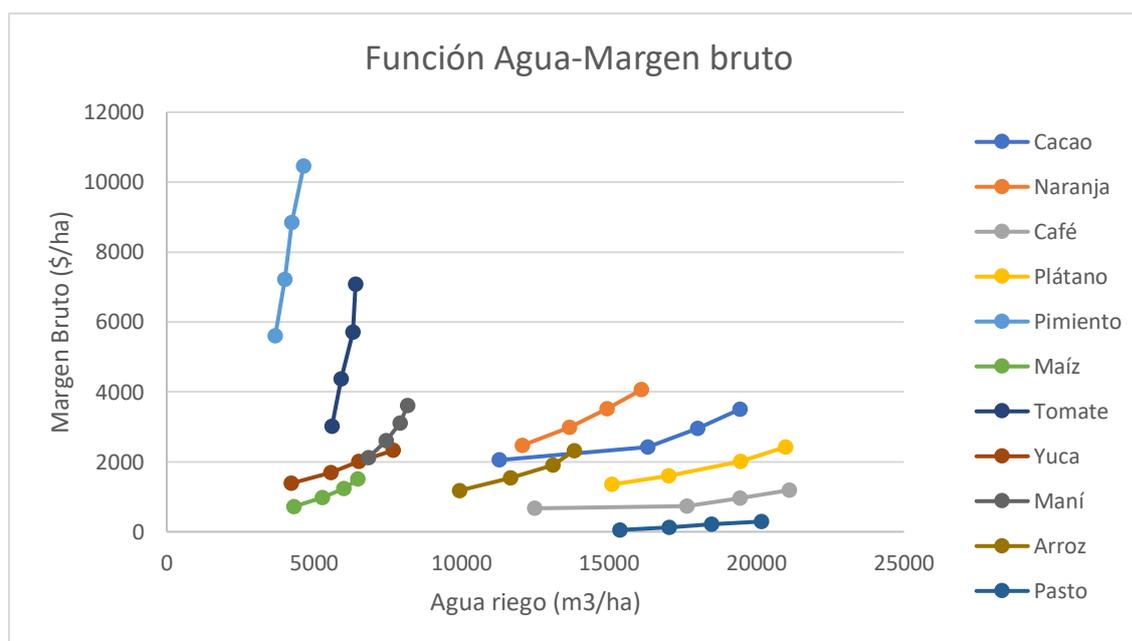


Figura 50. Funciones agua rendimiento de los cultivos en el escenario 1. Fuente: Elaboración propia.

En la figura (50), correspondiente al escenario 1, se aprecia que los cultivos más rentables son el pimiento y el tomate con un margen bruto de casi 10.500,00 y 7.075,00 US\$ respectivamente cuando se aplica el 100,00 % del agua que requieren esos cultivos. A su vez son dos cultivos

que su margen bruto oscila prácticamente en una línea vertical, lo que indica una variación del margen-bruto elevada con una pequeña disminución del agua aplicada, también es evidente que son de los cultivos que menor cantidad de agua requieren juntamente con el cultivo de maní, yuca y maíz, mientras que los cultivos más demandantes de agua son el café, plátano, cacao y pasto. Si bien, el resto de cultivos tiene menor rentabilidad, su variabilidad del margen-bruto es menor, pues como se observa, tienen una curvatura casi horizontal o ligeramente inclinada. Si se aplica riego deficitario a un 70,00% del agua que realmente requieren los cultivos, el pimiento seguiría siendo el que mayor margen-bruto presenta con 5.600,00 US\$, pero el tomate prácticamente tuviera el mismo margen-bruto que algunos cultivos como la naranja, el cacao y el maní.

Los dos cultivos menos rentables bajo este escenario son el café y el pasto con un margen-bruto máximo de 1.191,00 y 292,00 US\$ respectivamente.

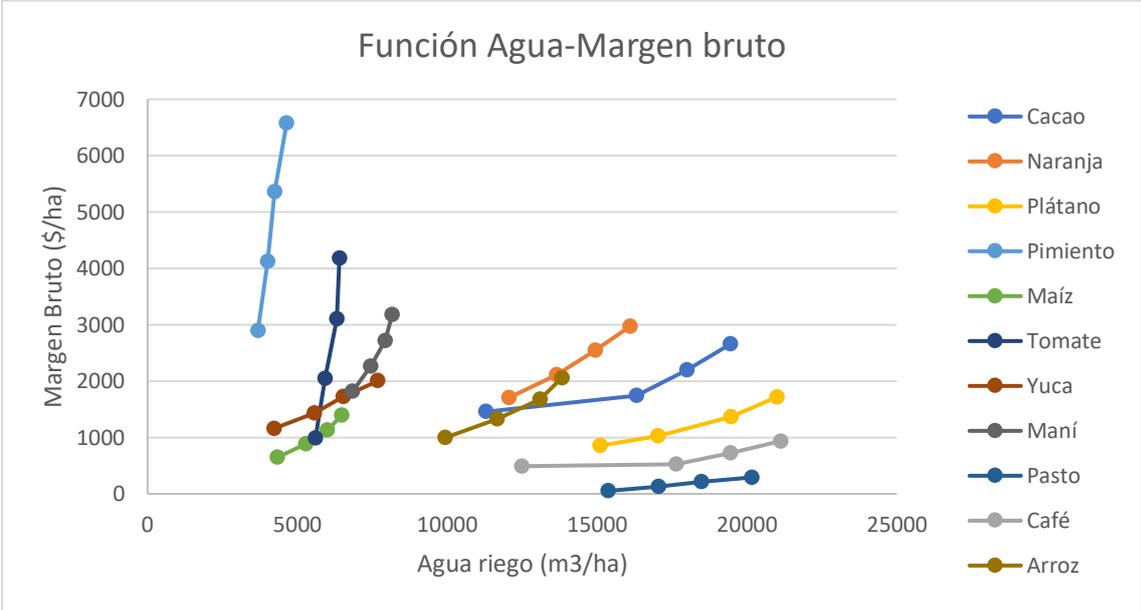


Figura 51. Funciones agua rendimiento de los cultivos en el escenario 2. Fuente: Elaboración propia.

En la figura (51), se observan las funciones agua-margen bruto para los diferentes cultivos basados en el escenario 2. Los cultivos más rentables siguen siendo el pimiento y el tomate con un margen bruto de casi 6.500,00 y 4.200,00 US\$ respectivamente cuando se aplica el 100,00 % del agua que requieren esos cultivos. El margen bruto continúa oscilando prácticamente en una línea vertical, lo que indica una variación del margen-bruto elevada con una pequeña disminución del agua aplicada, también es evidente que son de los cultivos que menor cantidad de agua requieren juntamente con el cultivo de maní, yuca y maíz, mientras que los cultivos

más demandantes de agua son el café, plátano, cacao y pasto. Si bien, el resto de cultivos tiene menor rentabilidad, su variabilidad del margen-bruto es menor, pues como se observa, tienen una curvatura casi horizontal o ligeramente inclinada. En este escenario, si se aplica un riego deficitario de un 70,00 %, el resultado sería que el cultivo de pimienta seguiría teniendo el mayor valor de margen-bruto, pero a continuación, el maní, cacao y naranja tendrían mayor margen-bruto que el tomate. Los dos cultivos menos rentables bajo este escenario siguen siendo el café y el pasto con un margen-bruto máximo de 935,00 y 292,00 US\$ respectivamente.

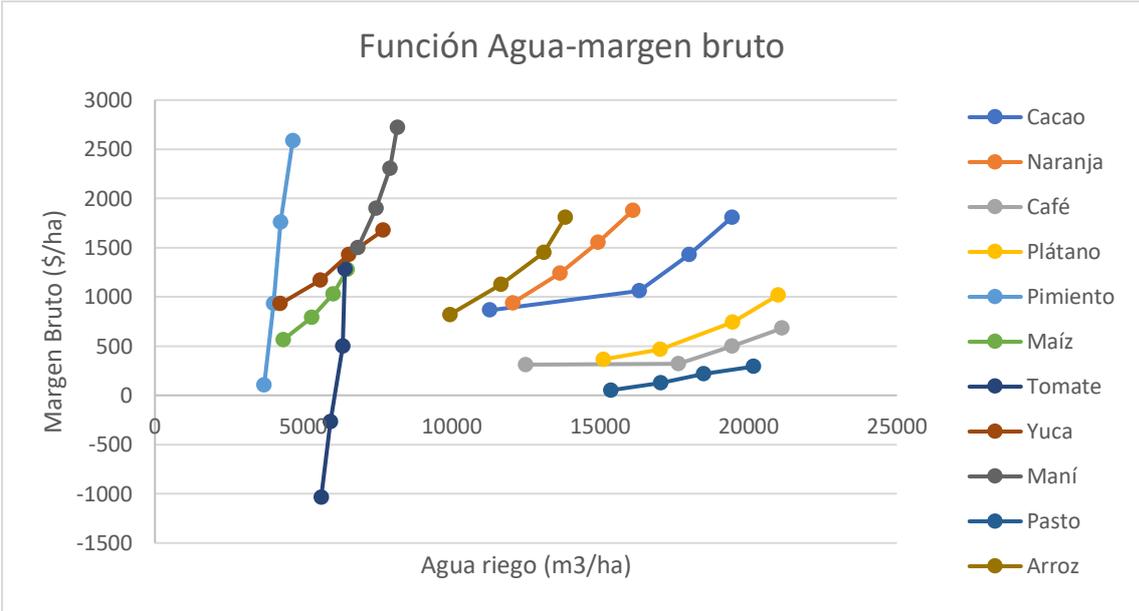


Figura 52. Funciones agua rendimiento de los cultivos en el escenario 3. Fuente: Elaboración propia.

En la figura (52), correspondiente al escenario 3, se observa que los cultivos más rentables son el maní y el pimienta con un margen bruto de casi 2.700,00 y 2.500,00 US\$ respectivamente cuando se aplica el 100,00 % del agua que requieren esos cultivos; seguidamente el cultivo de naranja, cacao, arroz y yuca tienen un margen-bruto cercano a 2.000,00 US\$; Bajo este escenario, el tomate tiene un margen-bruto positivo cuando se le aplica más del 80,00 % de los requerimientos totales de riego, caso contrario, la rentabilidad del cultivo será negativa. Si se aplica un riego deficitario que aporte el 70,00 % del agua requerida por los cultivos, el maní seguiría siendo el más rentable, seguido ahora por el cultivo de yuca, naranja, arroz y cacao. Los cultivos menos rentables bajo este escenario son el café, pasto y el tomate con un margen-bruto máximo de 311,00, 50,00 y de -1.000,00 US\$ respectivamente.

## **Optimización de la asignación de agua y distribución de la superficie de los cultivos:**

### **Escenario 1:**

Bajo el escenario 1, el modelo de optimización económica, da como resultado que, para maximizar el margen-bruto de los cultivos, del área de influencia del sistema de riego Carrizal-Chone, considerando una superficie bajo regadío de 10.000,00 hectáreas, y un volumen de agua disponible de 100,00 hm<sup>3</sup>, (siendo la superficie, y el volumen de agua total disponible, el mismo para los 3 escenarios empleando el modelo de optimización económica) , se debe sembrar 1.500,00 hectáreas de pimiento y 1.500,00 hectáreas de tomate, aplicando el 100,00 % de agua, es decir un volumen de 4.640,00 y 6.400,00 m<sup>3</sup>/ha respectivamente. De este modo, el cultivo de pimiento y tomate representan un margen-bruto de 15´896.556,00 y 9´892.320,00 US\$ con un consumo de agua de 6,960 y 9,600 hm<sup>3</sup> respectivamente. Seguidamente el cultivo de naranja, maní, cacao y plátano deben tener una superficie de siembra de 1.000,00, 1.100,00, 1.500,00 y 1.000,00 hectáreas respectivamente. El cultivo de naranja se le aplicará un riego deficitario del 85,00 %, lo que significa un volumen por hectárea de 14.228,00 m<sup>3</sup>; al maní se le aplicará el 100,00 % de agua (8.160,00 m<sup>3</sup>/ha), mientras que al cacao y al plátano se aplicará un riego deficitario del 70,00 % (11.280,00 y 15.100,00 m<sup>3</sup>/ha respectivamente). Finalmente, a los cultivos de yuca, arroz, maíz, café y pasto deberán tener una superficie de siembra de 200,00, 250,00, 250,00, 800,00 y 900,00 hectáreas respectivamente, aplicando un riego deficitario del 70,00 % para los 5 cultivos, lo que representa un volumen de riego de 4.220,00, 9.930,00, 4.320,00, 12.480,00 y 15.360,00 m<sup>3</sup>/ha respectivamente.

De este modo se obtiene un margen bruto para las 10.000,00 hectáreas de regadío de 38´320.354,00 US\$, lo que significa un valor de 0,3832 US\$/m<sup>3</sup> y de 3.832,03 US\$/ha, en promedio.

Tabla 32. Optimización de la asignación de agua y superficie de siembra de los cultivos bajo el escenario 1.

Cultivo	Asignación de agua (%)	Riego (m3/ha)	Margen Bruto Total (\$/cultivo)	Superficie (ha/cultivo)	Riego total (hm3/cultivo)
Pimiento	100,00	4640,00	15896556,00	1500,00	6,96
Tomate	100,00	6400,00	9892320,00	1500,00	9,60
Naranja	85,00	14228,86	3278306,04	1000,00	14,22
Maní	100,00	8160,00	3825646,02	1100,00	8,97
Cacao	70,00	11280,00	2875525,50	1500,00	16,92
Plátano	70,00	15100,40	1301241,88	1000,00	15,10
Yuca	70,00	4220,40	272454,08	200,00	0,84
Arroz	70,00	9930,60	280748,94	250,00	2,48
Maíz	70,00	4320,00	171261,00	250,00	1,08
Café	70,00	12480,00	481714,40	800,00	9,98
Pasto	70,00	15360,00	44580,60	900,00	13,82
			<b>38320354,47</b>	<b>10000,00</b>	<b>100,00</b>
			<b>Total Margen Bruto (\$)</b>	<b>Total superficie (ha)</b>	<b>Total volumen (hm3)</b>

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla (33), se analizó el resultado de la asignación de agua, y distribución de superficie de siembra de cultivos sin optimizar, donde el área fue igual para todos los cultivos con una superficie de siembra de 909,09 hectáreas y la dotación del 100,00 % de agua a cada uno de los cultivos. Los cultivos que mayor ganancia generan son el pimiento y el tomate con valores correspondientes a 9'634.276,36 y 5'995.345,45 US\$ respectivamente. Los cultivos que presentan menor margen-bruto son el café y el pasto con un valor de 979.402,73 y 267.140,00 US\$ respectivamente. El resto de cultivos tiene valores de ganancia entre los US\$ 3'650.212,53 como el caso de la naranja y US\$ 1'315.341,82 como en caso del maíz.

En este escenario donde no se ha implementado el modelo de optimización el volumen total de agua asignado es de 131,810 hm<sup>3</sup>, y el margen-bruto total tiene un valor de 34'223.212,89 US\$, lo que representa un valor de 0,2596 US\$/m<sup>3</sup> y de 3.422,32 US\$/ha, en promedio.

*Tabla 33. Asignación de agua y superficie de siembra de los cultivos bajo el escenario 1 sin modelo de optimización.*

Cultivo	Asignación de agua (%)	Riego (m <sup>3</sup> /ha)	Margen Bruto Total (\$/cultivo)	Superficie (ha/cultivo)	Riego total (hm <sup>3</sup> /cultivo)
Pimiento	100,00	4640,00	9634276,26	909,09	4,21
Tomate	100,00	6400,00	5995345,39	909,09	5,81
Naranja	100,00	16100,67	3650212,48	909,09	14,63
Maní	100,00	8160,00	3161690,87	909,09	7,41
Cacao	100,00	19440,00	2958582,69	909,09	17,67
Plátano	100,00	20990,20	2145126,28	909,09	19,08
Yuca	100,00	7680,00	2106472,70	909,09	6,98
Arroz	100,00	13820,40	2009621,65	909,09	12,56
Maíz	100,00	6480,00	1315341,80	909,09	5,89
Café	100,00	21120,00	979402,71	909,09	19,19
Pasto	100,00	20160,00	267139,99	909,09	18,32
			<b>34223212,89</b>	<b>10000,00</b>	<b>131,81</b>
			<b>Total Margen Bruto (\$)</b>	<b>Total superficie (ha)</b>	<b>Total volumen (hm<sup>3</sup>)</b>

*Fuente: Elaboración propia.*

## Escenario 2:

En la tabla (34), se observa los resultados del modelo de optimización económica bajo condiciones del escenario 2. Bajo el escenario planteado, para maximizar el margen-bruto de los cultivos del área de influencia del sistema de riego Carrizal-Chone, se debe sembrar 1.500,00 hectáreas de pimiento y 1.500,00 hectáreas de tomate aplicando el 100,00 % de agua, es decir un volumen de 4.640,00 y 6.400,00 m<sup>3</sup>/ha respectivamente.

Dado que el precio de venta es distinto que en el escenario 1, estos cultivos tendrán un margen-bruto 10'031.668,00 y 5'697.540,00 US\$ con un consumo de agua de 6,960 y 9,600 hm<sup>3</sup> respectivamente. Seguidamente el cultivo de naranja, maní, cacao y plátano deben tener una superficie de siembra de 1.000,00, 1.100,00, 1.500,00 y 1.000,00 hectáreas respectivamente. El cultivo de naranja se le aplicará un riego deficitario del 80,00 %, lo que significa un volumen por hectárea de 13.688,00 m<sup>3</sup>; al maní se le aplicará el 100,00 % de agua (8.160,00 m<sup>3</sup>/ha), mientras que al cacao y al plátano se aplicará un riego deficitario del 70,00 % (11.280,00 y 15.100,00 m<sup>3</sup>/ha respectivamente). Finalmente, a los cultivos de yuca, arroz, maíz, café y pasto deberán tener una superficie de siembra de 200,00, 250,00, 250,00, 800,00 y 900,00 hectáreas respectivamente, aplicando el 100,00 % para el maíz y 70,00 % del agua total requerida para el resto de cultivos, lo que es igual a un volumen de agua de riego de 4.220,00, 9.930,00, 6.480,00, 12.480,00 y 15.360,00 m<sup>3</sup>/ha respectivamente. De este modo se obtiene un margen bruto para

las 10.000,00 hectáreas de regadío de 25'441.544,80 US\$, lo que significa que se obtiene un valor de 0,2544 US\$/m<sup>3</sup> de agua asignada y de 2.544,15 US\$/ha sembrada en promedio.

*Tabla 34. Optimización de la asignación de agua y superficie de siembra de los cultivos bajo el escenario 2.*

Cultivo	Asignación de agua (%)	Riego (m3/ha)	Margen Bruto Total (\$/cultivo)	Superficie (ha/cultivo)	Riego total (hm3/cultivo)
Pimiento	100,00	4640,00	10031688,00	1500,00	6,96
Tomate	100,00	6400,00	5697540,00	1500,00	9,60
Naranja	80,00	13688,86	2179316,30	1000,00	13,68
Maní	100,00	8160,00	3358586,00	1100,00	8,97
Cacao	70,00	11280,00	2011047,00	1500,00	16,92
Plátano	70,00	15100,40	804317,84	1000,00	15,10
Yuca	70,00	4220,40	227783,01	200,00	0,84
Arroz	70,00	9930,60	235710,53	250,00	2,48
Maíz	100,00	6480,00	508647,50	250,00	1,62
Café	70,00	12480,00	342328,00	800,00	9,98
Pasto	70,00	15360,00	44580,60	900,00	13,82
			<b>25441544,79</b>	<b>10000,00</b>	<b>100,00</b>
			<b>Total Margen Bruto (\$)</b>	<b>Total superficie (ha)</b>	<b>Total volumen (hm3)</b>

*Fuente: Elaboración propia.*

En la tabla (35), se observa el resultado de la asignación de agua, y distribución de superficie de siembra de cultivos sin optimizar, donde el área fue igual para todos los cultivos con una superficie de siembra de 909,09 hectáreas y la dotación del 100,00 % de agua a cada uno de los cultivos. Los cultivos que mayor ganancia generan son el pimiento y el tomate con valores correspondientes a 6'079.810,91 y 3'453.054,55 US\$ respectivamente. Los cultivos que presentan menor margen-bruto con el café y el pasto con un valor de 754.245,45 y 267.140,00 US\$ respectivamente. Mientras que, el resto de cultivos tienen un valor de ganancia, que oscila entre los 2'667.463,37 US\$ como es el caso de la naranja y 1'849.627,27 US\$ como es el caso del maíz. En este escenario donde no se ha implementado el modelo de optimización el volumen total de agua asignado es de 131,810 hm<sup>3</sup>, y el margen-bruto total tiene un valor de 25'161.434,94 US\$, lo que representa un valor de 0,1908 US\$/m<sup>3</sup> y de 2.516,14 US\$/ha, en promedio.

*Tabla 35. Asignación de agua y superficie de siembra de los cultivos bajo el escenario 2 sin modelo de optimización.*

Cultivo	Asignación de agua (%)	Riego (m <sup>3</sup> /ha)	Margen Bruto Total (\$/cultivo)	Superficie (ha/cultivo)	Riego total (hm <sup>3</sup> /cultivo)
Pimiento	100,00	4640,00	6079810,84	909,09	4,21
Tomate	100,00	6400,00	3453054,51	909,09	5,81
Naranja	100,00	16100,67	2667463,34	909,09	14,63
Maní	100,00	8160,00	2775690,88	909,09	7,41
Cacao	100,00	19440,00	2217303,61	909,09	17,67
Plátano	100,00	20990,20	1505439,00	909,09	19,08
Yuca	100,00	7680,00	1814416,34	909,09	6,98
Arroz	100,00	13820,40	1777243,69	909,09	12,56
Maíz	100,00	6480,00	1849627,25	909,09	5,89
Café	100,00	21120,00	754245,44	909,09	19,19
Pasto	100,00	20160,00	267139,99	909,09	18,32
			<b>25161434,93</b>	<b>10000,00</b>	<b>131,81</b>
			<b>Total Margen Bruto (\$)</b>	<b>Total superficie (ha)</b>	<b>Total volumen (hm<sup>3</sup>)</b>

*Fuente: Elaboración propia.*

### Escenario 3:

En la tabla (36), se observan los resultados del escenario 3, para maximizar el margen-bruto de los cultivos del área de influencia del sistema de riego Carrizal-Chone, se debe sembrar 1.500,00 hectáreas de pimiento y 250,00 hectáreas de tomate aplicando el 100,00 % de agua, es decir un volumen de 4.640,00 y 6.400,00 m<sup>3</sup>/ha respectivamente; dado que el precio de venta en este escenario es más bajo que los otros escenarios, estos cultivos tendrán un margen-bruto 3'988.224,00 y 251.450,00 US\$ con un consumo de agua de 6,960 y 1,600 hm<sup>3</sup> respectivamente. Seguidamente el cultivo de naranja, maní, cacao y plátano deben tener una superficie de siembra de 1.000,00, 1.500,00, 1.500,00 y 1.000,00 hectáreas respectivamente. El cultivo de naranja se le aplicará un riego deficitario del 75,00 %, lo que significa un volumen por hectárea de 12.839,00 m<sup>3</sup>; al maní se le aplicará el 100,00 % de agua (8.160,00 m<sup>3</sup>/ha), mientras que al cacao y al plátano se aplicará un riego deficitario del 70,00 % (11.280,00 y 15.100,00 m<sup>3</sup>/ha respectivamente). Finalmente, a los cultivos de yuca, arroz, maíz, café y pasto deberán tener una superficie de siembra de 200,00, 250,00, 1100,00, 800,00 y 900,00 hectáreas respectivamente, aplicando el 100,00 % para el maíz, 75,00 para el arroz y 70,00 % del agua total requerida para el resto de cultivos. De este modo se obtiene un margen bruto para las 10.000,00 hectáreas de regadío de 12'698.807,45 US\$, lo que en promedio representa un valor de 0,1269 US\$/m<sup>3</sup> y 1.269,88 US\$/ha.

Tabla 36. Optimización de la asignación de agua y superficie de siembra de los cultivos bajo el escenario 3.

Cultivo	Asignación de agua (%)	Riego (m3/ha)	Margen Bruto Total (\$/cultivo)	Superficie (ha/cultivo)	Riego total (hm3/cultivo)
Pimiento	100,00	4640,00	3988224,00	1500,00	6,96
Tomate	100,00	6400,00	251450,00	250,00	1,60
Naranja	75,00	12839,18	1091606,10	1000,00	12,83
Maní	100,00	8160,00	3917178,00	1500,00	12,24
Cacao	70,00	11280,00	1149033,00	1500,00	16,92
Plátano	70,00	15100,40	312933,96	1000,00	15,10
Yuca	70,00	4220,40	182243,11	200,00	0,84
Arroz	75,00	10241,35	211302,87	250,00	2,56
Maíz	100,00	6480,00	1346305,40	1100,00	7,12
Café	70,00	12480,00	203950,40	800,00	9,98
Pasto	70,00	15360,00	44580,60	900,00	13,82
			<b>12698807,44</b>	<b>10000,00</b>	<b>100,00</b>
			<b>Total Margen Bruto (\$)</b>	<b>Total superficie (ha)</b>	<b>Total volumen (hm3)</b>

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla (37), se observa el resultado de la asignación de agua, y distribución de superficie de siembra de cultivos sin optimizar, donde el área fue igual para todos los cultivos con una superficie de siembra de 909,09 hectáreas y la dotación del 100,00 % de agua a cada uno de los cultivos. Los cultivos que mayor ganancia generan son el pimiento y el maní con valores correspondientes a 2'417.105,45 y 2'374.047,27 US\$ respectivamente. Los cultivos que presentan menor margen-bruto son el café y el pasto con un valor de 531.020,00 y 267.140,00 US\$ respectivamente. Mientras que, el resto de cultivos tienen un valor de ganancia que oscila entre los 1'679.950,00 US\$ como es el caso de la naranja y 872.929,98 US\$ como es el caso del plátano. En este escenario donde no se ha implementado el modelo de optimización el volumen total de agua asignado es de 131,810 hm<sup>3</sup>, y el margen-bruto total es de 14'718.766,36 US\$, lo que representa un valor de 0,1116 US\$/m<sup>3</sup> y de 1.471,87 US\$/ha, en promedio.

*Tabla 37. Asignación de agua y superficie de siembra de los cultivos bajo el escenario 3 sin modelo de optimización.*

Cultivo	Asignación de agua (%)	Riego (m3/ha)	Margen Bruto Total (\$/cultivo)	Superficie (ha/cultivo)	Riego total (hm3/cultivo)
Pimiento	100,00	4640,00	2417105,45	909,09	4,21
Tomate	100,00	6400,00	914363,63	909,09	5,81
Naranja	100,00	16100,67	1679950,33	909,09	14,63
Maní	100,00	8160,00	2374047,27	909,09	7,41
Cacao	100,00	19440,00	1478260,00	909,09	17,67
Plátano	100,00	20990,20	872929,98	909,09	19,08
Yuca	100,00	7680,00	1516838,18	909,09	6,98
Arroz	100,00	13820,40	1554462,40	909,09	12,56
Maíz	100,00	6480,00	1112649,09	909,09	5,89
Café	100,00	21120,00	531020,00	909,09	19,20
Pasto	100,00	20160,00	267140,00	909,09	18,32
			<b>14718766,35</b>	<b>10000,00</b>	<b>131,81</b>
			<b>Total Margen Bruto (\$)</b>	<b>Total superficie (ha)</b>	<b>Total volumen (hm3)</b>

*Fuente: Elaboración propia.*

## CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

### 5.1. Conclusiones

La zona del área de influencia del sistema de riego Carrizal-Chone, registra una evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) anual de 1.858,00 mm; con un promedio de 5,09 mm/día. Siendo los meses con mayor tasa de ET<sub>o</sub> marzo, septiembre y noviembre y la menor tasa los meses de enero y junio.

Los cultivos con un mayor requerimiento total de riego anual son, el cultivo de café, plátano, pasto, cacao y naranja con valores de 2.112,00, 2.099,20, 2.016,00, 1.944,00, y 1.610,67 mm/año respectivamente. Mientras que el cultivo con mayor requerimiento de riego total por campaña es el arroz con una necesidad de 1.382,40 mm/campaña.

Los cultivos que presentan un menor requerimiento total de riego por campaña son el maní, yuca, maíz, tomate y pimiento con un valor de 816,00, 768,00, 648,00, 640,00 y 464,00 mm/campaña respectivamente.

Lo referente al costo de producción de los diferentes cultivos varía mucho entre cada cultivo. El tomate y el pimiento son los cultivos hortícolas con mayor costo de producción con un valor de 6.270,00 y 5.620,00 US\$/ha, por campaña realizada. Mientras que los cultivos de cacao, plátano, arroz, maní, maíz, naranja, yuca, café y pasto tienen un costo de producción de 1.728,00 US\$/año, 1.542,00 US\$/año, 1.441,00 US\$/campaña, 1.159,00 US\$/campaña, 1.135,00 US\$/campaña, 1.123,50 US\$/año, 1.001,50 US\$/año, 931,50 US\$/año y 300,00 US\$/año respectivamente.

Todos los cultivos presentan una variabilidad de precios importante. El cultivo de cacao tiene un rango entre el precio del percentil 80 y 20 de 846,00 US\$/tm. Además, presenta una mayor probabilidad con un 34,00 % de que el precio de venta esté en el intervalo del percentil 80. El cultivo de café, en cambio tiene un rango de precio de venta entre ambos percentiles de 512,00 US\$/tm, y a su vez, una mayor probabilidad con un 37,00 % de que el precio de venta sea el promedio. El rango de precio de venta del cultivo de plátano entre los percentiles 80 y 20 es de 141,00 US\$/tm. Este cultivo tiene la mayor probabilidad con un 37,00 % de que el precio de venta sea el promedio.

El cultivo de naranja tiene un rango de precios entre ambos percentiles de 182,00 US\$/tm. Y, tiene la mayor probabilidad de que el precio de venta sea el promedio con un 19,00 %. El rango de precios de venta para el cultivo de pimiento es de 492,00 US\$/tm entre el percentil 80 y 20, y este cultivo presenta la mayor probabilidad con un 21,00 % de que el precio de venta sea el del percentil 20. El cultivo de tomate obtuvo un rango de precios de venta de 290,00 US\$/tm, presentando a su vez la mayor probabilidad con un 35,00 % de que el precio de venta sea del percentil 80.

El rango de precios para el cultivo de maíz es de 25,00 US\$/tm. Este cultivo tiene una mayor probabilidad con un 17,00 % de que el precio de venta sea del percentil 20. El cultivo de arroz presenta un rango entre precios de 114,00 US\$/tm y a su vez tiene la mayor probabilidad con un 18,00 % de que el precio de venta sea del percentil 80. El rango de precios para el cultivo de maní es de 445,00 US\$/tm, presentando además una mayor probabilidad con un 17,00 % de que el precio de venta corresponda al percentil 20. El rango de precios para el cultivo de yuca es de 43,00 US\$/tm, presentando una mayor probabilidad con un 21,00 % de que el precio de venta corresponda al percentil 20.

Al emplear el modelo de optimización económica para el escenario 1, se obtiene un margen-bruto de 38.320.354,48 US\$, cumpliendo las restricciones tanto de superficie como de volumen de agua total disponible (10.000,00 ha y 100,00 hm<sup>3</sup>). El modelo asigna a los cultivos más rentables, el máximo de agua que requiere el cultivo y además le asigna el máximo de superficie disponible para cada cultivo. De esta manera, se logra una ratio de 0,38 US\$/m<sup>3</sup>.

Bajo el mismo escenario, pero sin emplear un modelo de optimización, se obtiene un margen-bruto de 34.223.212,89 US\$, pero asignando un volumen de agua de 131,81 hm<sup>3</sup>, lo que significa una ratio de 0,26 US\$/m<sup>3</sup>.

En el escenario 2, se obtiene en los resultados del modelo de optimización económica, un margen-bruto de 25.441.544,80 US\$ igualmente cumpliendo las restricciones de superficie y volumen; de esta manera se alcanza una ratio de 0,25 US\$/m<sup>3</sup>.

A su vez, los resultados para el mismo escenario, pero sin el modelo de optimización económica, se obtiene un margen-bruto de 25.161.434,94 US\$ mediante la asignación de 131,81 hm<sup>3</sup>, lo que corresponde a una ratio de 0,19 US\$/m<sup>3</sup>.

Los resultados del escenario 3, muestran que, con el uso del modelo de optimización aparte de cumplir con las restricciones, se obtiene un margen-bruto de 12.698.807,45 US\$, lo que corresponde a una ratio de 0,12 US\$/m<sup>3</sup>. Mientras que, bajo el mismo escenario, pero sin el modelo de optimización, se obtiene un margen-bruto de 14.718.766,40 US\$, mediante la asignación de un volumen de 131,81 hm<sup>3</sup>, lo que corresponde a una ratio de 0,11 US\$/m<sup>3</sup>.

## **5.2. Aportes del trabajo a la sociedad**

Los resultados de este trabajo, como es el caso de las necesidades totales de riego y la programación de riego para los diferentes cultivos, pueden servir para que el sector agrícola cuente con esta información y la puedan emplear en sus actividades agrícolas, permitiendo contar con calendarios de riego y dosis de riego por cada cultivo, considerando datos climáticos, de suelo y etapas fenológicas.

Además, el análisis del riesgo de la variabilidad de los precios puede servir para que el agricultor identifique que cultivos varían más de precio, y puede usar también los precios de costos de producción para planificar la inversión a realizar antes de la siembra.

Estos datos también sirven para que entidades gubernamentales o no gubernamentales encargadas de la gestión del agua cuenten con datos que les permita una asignación del agua más eficiente basados en las necesidades reales de los cultivos. También, el empleo del modelo de optimización económica es un claro ejemplo de que, para ser más eficientes, ya sea en el uso del agua y/o en la asignación de superficies de siembra se debe implementar el uso de herramientas matemáticas que ayuden en la toma de decisiones.

## CAPÍTULO VI. BIBLIOGRAFÍA

- AAIC. (2003). *El Cultivo de Tomate Riñon en invernadero (Lycopersicum esculentum)*. Asociación de Indígenas del Cañar. Retrieved from [http://digitalrepository.unm.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1366&context=abya\\_yala](http://digitalrepository.unm.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1366&context=abya_yala)
- Adeboye, O. B. (2015). *Sustainable Use of Land and Water under Rainfed and Deficit Irrigation Conditions in Ogun-Osun River Basin, Nigeria*. Delft. Retrieved from <https://repository.tudelft.nl/view/ihe/uuid:7f079569-4123-46df-bc5b-5649cbc486a3/>
- Albiac, J. Dinar, A. (2009). *The management of water quality and irrigation technologies*. (Earthscan, Ed.). Gateshead.
- Ayala, C. (2009). *Estudio de prefactibilidad para la producción y comercialización de maní (Arachis hypogaea) en el cantón Jipijapa, provincia de Manabí*. Universidad San Francisco de Quito. Retrieved from <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/847/1/91546.pdf>
- Borbor, A., & Suárez, G. (2007). "Producción de tres híbridos de pimiento (*Capsicum annum*) a partir de semillas sometidas a inbibición e imbibición más campo magnético en el campo experimental Río Verde, cantón Santa Elena." Universidad Estatal Península de Santa Elena. Retrieved from [http://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/901/1/BORBOR\\_NEIRA\\_ALBERTO\\_Y\\_SUÁREZ\\_SUÁREZ\\_GARDENIA.pdf](http://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/901/1/BORBOR_NEIRA_ALBERTO_Y_SUÁREZ_SUÁREZ_GARDENIA.pdf)
- Calderón, M., & Rodríguez, C. (2016). *Efecto de la utilización con la asociación de gramíneas-leguminosas en (UDIVI) pasto y forraje, hatos bovinos de la espam &quot;mfl&quot;*; Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí. Retrieved from <http://repositorio.espam.edu.ec/bitstream/42000/278/1/TMV101.pdf>
- Carrión, P., López, E., Ortega, J. F., & De Juan, A. (2003). Optimización mediante algoritmos genéticos de la gestión del agua en el regadío. *Rev. Int. Mét. Num. Cál. Dis. Ing.*, 19(4), 447–462. Retrieved from <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/2975/RR194D.pdf>
- Cisneros, E., González, F., Martínez, R., López, T., & Rey, R. (2015). Yield response of the coffee to irrigation management. Water yield function. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 24(4), 5–11. Retrieved from <http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v24n4/rcta01415.pdf>
- Cisneros, R. (2003). Riego y drenaje. San Luis de Potosí. Retrieved from [http://www.ingenieria.uaslp.mx/Documents/Apuntes/Riego\\_y\\_Drenaje.pdf](http://www.ingenieria.uaslp.mx/Documents/Apuntes/Riego_y_Drenaje.pdf)
- Clavijo, H., & Peñaherrera, C. (2013). *Diseño de una red de estaciones meteorológicas para previsión de crecidas e inundaciones, en las subcuencas de los ríos Chone, Portoviejo, Bulu-Bulu y Chongón*. Escuela Politécnica Nacional. Retrieved from [bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/6730/1/CD-5111.pdf](http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/6730/1/CD-5111.pdf)
- COFUPRO. (2010). Riego por aspersión y localizado. México D.F. Retrieved from [http://www.cofupro.org.mx/cofupro/images/contenidoweb/indice/publicaciones-nayarit/FOLLETOS\\_Y\\_MANUALES/FOLLETOS\\_IMTA\\_2009/folleto\\_3\\_RiegoAspersion.pdf](http://www.cofupro.org.mx/cofupro/images/contenidoweb/indice/publicaciones-nayarit/FOLLETOS_Y_MANUALES/FOLLETOS_IMTA_2009/folleto_3_RiegoAspersion.pdf)
- CREA. (2013). MOPECO-Modelo de Optimización Económica del Riego. Retrieved July 7,

- 2017, from [http://crea.uclm.es/crea/descargas/MOPECO\\_app.php](http://crea.uclm.es/crea/descargas/MOPECO_app.php)
- El Comercio. (2011). Manabí es la mayor provincia agrícola. Retrieved July 7, 2017, from <http://www.elcomercio.com/actualidad/negocios/manabi-mayor-provincia-agricola.html>
- El Comercio. (2017). El cacao CCN-51 pasó de patito feo a cisne de la producción ecuatoriana | El Comercio. Retrieved July 7, 2017, from <http://www.elcomercio.com/actualidad/negocios/cacao-ccn-51-paso-de.html>
- FAO. (2000). *Irrigation in Latin America and the Caribbean in figures*. Roma. Retrieved from <ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/wr20.pdf>
- FAO. (2002). *Irrigation manual. Planning, development, monitoring and evaluation of irrigated agriculture with farmer participation*. Harare. Retrieved from <ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/irrigman1.pdf>
- FAO. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma. Retrieved from <ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/idp56s.pdf>
- FAO. (2010). Sistematización de prácticas para el aprovechamiento de Recursos Naturales en la cuenca del Chone Representación de la FAO en Ecuador. Quito. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/013/am029s/am029s.pdf>
- FAO. (2012). *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua*. Roma. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i2800s.pdf>
- Fernández, M., & García, G. (2014). El sistema de riego localizado. *Tecnología Agroalimentaria*, 8. Retrieved from <http://www.serida.org/pdfs/6003.pdf>
- Fuentes, J., & García, G. (1999). *Técnicas de riego. Sistemas de riego en la agricultura* (1st ed.). Mexico: Mundi Prensa. Retrieved from [www.cba.gov.ar/wp-content/4p96humuzp/2015/09/Tecnicas-de-Riego.pdf](http://www.cba.gov.ar/wp-content/4p96humuzp/2015/09/Tecnicas-de-Riego.pdf)
- Gómez, G. (2010). Cultivo y beneficio del café. *Revista de Geografía Agrícola*, 45, 103–193. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/757/75726134008.pdf>
- González, F., Herrera, J., López, T., & Cid, G. (2011). Crop response to the water deficit. *Ingeniería Agrícola*, 1(2), 31–40. Retrieved from [http://dima.chapingo.mx/revista/Vol\\_1\\_n\\_2\\_2011/pdf/IA06211.pdf](http://dima.chapingo.mx/revista/Vol_1_n_2_2011/pdf/IA06211.pdf)
- González, F., Herrera, J., López, T., & Cid, G. (2013). Crop water production functions for 14 crops in south of Havana conditions. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22(3), 5–11. Retrieved from <http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v22n3/rcta01313.pdf>
- Gurovich, L. (1985). *Fundamento y diseño de sistemas de riego*. San José. Retrieved from <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A9806e/A9806e.pdf>
- Hernández, J. (2014). *Crecimiento y producción de naranja cv. Valencia Citrus sinensis (L.) Osbeck, como respuesta a la aplicación de correctivos y fertilizante*. Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/11842/1/8161113.2014.pdf>
- INIA. (2005). Manejo del riego localizado y fertirrigación. La Cruz. Retrieved from <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/boletines/NR32334.pdf>
- INIAP. (1999). *Manual del cultivo de cacao* (2nd ed.). Pichilingue.

- INIAP. (2004). Maní. Guía del cultivo para las zonas de Loja y El Oro. Boliche. Retrieved from <http://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/1994/1/iniaplsbd314.pdf>
- INIAP. (2010). *Manejo técnico del cultivo de cacao en Manabí*. Pichilingue. Retrieved from <http://www.iniap.gob.ec/web/wp-content/uploads/2015/09/1599.pdf>
- INIAP. (2012). Banano, plátano y otras musáceas. Retrieved July 7, 2017, from <http://www.iniap.gob.ec/web/banano-platano-y-otras-musaceas/>
- Izquierdo, R. (2012). *Evaluación del cultivo de maíz (Zea mays), como complemento a la alimentación de bovinos de leche en épocas de escasez de alimento. Cayambe-Ecuador*. Universidad Politécnica Salesiana. Retrieved from <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1832/15/UPS-YT00102.pdf>
- Junta de Andalucía. (2010). *Manual de riego para agricultores. Riego localizado*. Sevilla. Retrieved from [http://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/1337160941RIEGO\\_BAJA.pdf](http://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/1337160941RIEGO_BAJA.pdf)
- López-Mata, E., Orengo-Valverde, J. J., Tarjuelo, J. M., Martínez-Romero, A., & Domínguez, A. (2016). Development of a direct-solution algorithm for determining the optimal crop planning of farms using deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 171, 173–187. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.03.015>
- MAGAP. (2012). Tercer Censo Nacional Agropecuario. Retrieved July 8, 2017, from <http://sinagap.agricultura.gob.ec/index.php/resultados-censo-nacional/file/591-reporte-de-resultados-censo-nacional-completo>
- MAGAP. (2014). *Rendimiento del arroz en el Ecuador, segundo cuatrimestre del 2014 (julio-octubre)*. Retrieved from [http://sinagap.agricultura.gob.ec/pdf/estudios\\_agroeconomicos/rendimiento\\_arroz\\_2do\\_cuatrimstre\\_2014.pdf](http://sinagap.agricultura.gob.ec/pdf/estudios_agroeconomicos/rendimiento_arroz_2do_cuatrimstre_2014.pdf)
- MAGAP. (2016). *Rendimientos de café grano seco en el Ecuador 2016*. Quito. Retrieved from [http://sinagap.agricultura.gob.ec/pdf/estudios\\_agroeconomicos/rendimiento\\_cafe\\_grano\\_seco2016.pdf](http://sinagap.agricultura.gob.ec/pdf/estudios_agroeconomicos/rendimiento_cafe_grano_seco2016.pdf)
- Martínez, A. (2014). Necesidades hídricas en cultivos hortícolas, 34–37. Retrieved from [http://www.horticom.com/revistasonline/horticultura/rh177/034\\_041.pdf](http://www.horticom.com/revistasonline/horticultura/rh177/034_041.pdf)
- Megh, R., & Ramírez, V. (2007). *Manejo de riego por goteo* (2nd ed.). San Juan.
- Mendoza, A. (2013). Riego por goteo. San Salvador. Retrieved from <http://www.centa.gob.sv/docs/guias/riego/Riego por goteo.pdf>
- Míguez, D. F. (2014). Análisis de riesgos en emprendimientos agropecuarios. Evaluación de resultados económicos esperados en proyectos productivos en el oeste de la provincia de Buenos Aires,. *Revista de Investigación En Modelos Financieros -Año, 3(1)*, 69–92. Retrieved from [http://bibliotecadigital.econ.uba.ar/download/rimf/rimf\\_v3\\_n1\\_05.pdf](http://bibliotecadigital.econ.uba.ar/download/rimf/rimf_v3_n1_05.pdf)
- Ortega, D., Mejía, E., Palacios, E., Rendón, L., & Exebio, A. (2009). Modelo de optimización de recursos para un distrito de riego. *Terra Latinoamericana*, 27(3), 1–8. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v27n3/v27n3a6.pdf>
- Ortega, J., De Juan, J., Valero, J., Tarjuelo, J., López, E., & Mata, L. (2004). MOPECO: an economic optimization model for irrigation water management. *Irrigation Science*, 23, 61–75. <https://doi.org/10.1007/s00271-004-0094-x>

- Ortiz, E. (2015). *Definición de las reglas de operación hidráulica del embalse La Esperanza*. Escuela Politécnica Nacional. Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/11864/1/CD-6571.pdf>
- Pereira, L., De Juan, J., Picornell, M., & Tarjuelo, J. (2010). *El riego y sus tecnologías* (1st ed.). Albacete. Retrieved from [http://crea.uclm.es/crea/descargas/\\_files/El\\_Riego\\_y\\_sus\\_Tecnologias.pdf](http://crea.uclm.es/crea/descargas/_files/El_Riego_y_sus_Tecnologias.pdf)
- Ramos, A., Sánchez, P., Ferrer, J. M., Barquín, J., & Linares, P. (2010). Modelos matemáticos de optimización. Madrid. Retrieved from [https://www.gams.com/fileadmin/community/contrib/doc/modelado\\_en\\_gams.pdf](https://www.gams.com/fileadmin/community/contrib/doc/modelado_en_gams.pdf)
- Revilla, F. (n.d.). *Riego por aspersión* (1st ed.). Castilla y León. Retrieved from <http://lan.inea.org:8010/web/materiales/riegoAspersion.pdf>
- Solis, A. (2007). *El cultivo de plátano (genero musa) en México*. Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro.” Retrieved from <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/4956/T16494>  
SOLIS ROSALES, ADALBERTO TESIS.pdf?sequence=1
- Temis, A., López, A., & Sosa, M. (2011). Producción de café (*Coffea arabica* L.): cultivo, beneficio, plagas y enfermedades. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 5(2), 54–74. Retrieved from [http://www.udlap.mx/WP/tsia/files/No5-Vol-2/TSIA-5\(2\)-Temis-Perez-et-al-2011.pdf](http://www.udlap.mx/WP/tsia/files/No5-Vol-2/TSIA-5(2)-Temis-Perez-et-al-2011.pdf)
- Tostado, P. (2010). *Diseño hidráulico de un sistema de riego por goteo para una huerta aguacatera pequeña*. Universidad Nacional Autónoma de México. Retrieved from <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2265/Tesis.pdf?sequence=1>
- Ulloa, S. (2012). Manual del cultivo de plátano de exportación. Santo Domingo. Retrieved from <http://giat.espe.edu.ec/wp-content/uploads/2012/12/Outline-del-libro.pdf>
- USDA. (1997). *Irrigation Guide* (1st ed.). Retrieved from [https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/nrcs144p2\\_033068.pdf](https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs144p2_033068.pdf)
- USDA. (2001). *Irrigation and drainage. A national research plan to meet competing demands and protect the environment*. Retrieved from <https://www.ars.usda.gov/ARUserFiles/oc/np/irrigationdrainage/IrrigDrainBro.pdf>
- Vásquez, A., Vásquez, I., Vásquez, C., & Cañamero, M. (2017). *Fundamentos de la Ingeniería de Riegos*. (1st ed.). Lima. Retrieved from <https://drive.google.com/file/d/0ByQ8dgir5Z9-S3ExNFRuSVBHSWs/view>
- Villalta, J. (2015). *Costos de producción de 2 hectáreas de cacao CCN-51 de la finca Mónica Narcisa, recinto Cañalito, Cantón Quevedo. Año 2014*. Universidad técnica Estatal de Quevedo. Retrieved from <http://mail.uteq.edu.ec/bitstream/43000/152/1/T-UTEQ-0005.pdf>
- Yesim, C., Yazar, A., Sertan, S., & Ilker, C. (2017). Evaluation of yield and leaf water potential (LWP) for eggplant under varying irrigation regimes using surface and subsurface drip systems. *Scientia Horticulturae*, 219, 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.02.051>
- Zambrano, J. (2016). *Evaluación de la influencia de actividades productivas del cultivo yuca, en la calidad del suelo, comunidad San Pablo de Tarugo*. Escuela Superior Politécnica

Agropecuaria de Manabí. Retrieved from  
<http://repositorio.espam.edu.ec/bitstream/42000/290/1/TMA91.pdf>

Zhang, X., Qin, W., Chen, S., Shao, L., & Sun, H. (2017). Responses of yield and WUE of winter wheat to water stress during the past three decades—A case study in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 179, 47–54.  
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.05.004>

## **ANEJOS**

## ANEJO I



*Anejo 1.1. Tubería principal del sistema de riego Carrizal-Chone.*



*Anejo 1.2. Ramal principal del sistema de riego Carrizal-Chone y una estación de control.*

## ANEJO II

Metodología para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ETo mm/d).

Día calendario	Mes	Día	Día juliano	Declinación solar (radianes)	Latitud (radianes)	Áng. Radiación	Dur. Máx. Insolación (h)	Heliofania (h)
				$\delta$	$\phi$	Ws	N	n
1-ene	1	1	1	-0.401	0.01424	1.565	11.954	0.817
2-ene	1	2	2	-0.400	0.01424	1.565	11.954	0.600
3-ene	1	3	3	-0.398	0.01424	1.565	11.954	2.683
4-ene	1	4	4	-0.396	0.01424	1.565	11.954	1.950
5-ene	1	5	5	-0.395	0.01424	1.565	11.955	0.967

Inv. Dist relativa tierra al sol	Constante solar (MJ m <sup>2</sup> día)	Radiación solar extraterrestre (MJ m <sup>2</sup> día)	Radiación solar global entrante (MJ m <sup>2</sup> día)	Radiación neta de onda corta (MJ m <sup>2</sup> día)	Radiación solar sin nubes (MJ m <sup>2</sup> día)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura media (°C)
dr	Gsc	Ra	Rs	Rns	Rso	Tmax	Tmin	Tmed
1.033	0.082	35.404	10.060	7.746	26.564	30.25	22.45	26.35
1.033	0.082	35.427	9.746	7.504	26.581	30.20	22.27	26.23
1.033	0.082	35.451	12.841	9.888	26.599	32.00	23.03	27.52
1.033	0.082	35.476	11.762	9.057	26.618	31.17	22.77	26.97
1.033	0.082	35.503	10.311	7.940	26.638	29.63	22.47	26.05

Presión de vapor de saturación a Tmax (kPa)	Presión de vapor de saturación a Tmin (kPa)	Humedad relativa (%)	Humedad relativa mín (%)	Presión de vapor real (kPa)	T. max. absoluta (°C+273,16)	T. min. absoluta (°C+273,16)	Radiación neta de onda larga (MJ m <sup>2</sup> día)	Radiación neta (MJ m <sup>2</sup> día)
e°(Tmax)	e°(Tmin)	HR	HR mín	ea	Tmax, K <sup>4</sup>	Tmin, K <sup>4</sup>	Rnl	Rn
4.30	2.72	83.67	63.13	2.273	8.47E+09	7.64E+09	0.821	6.925
4.29	2.69	83.83	62.61	2.253	8.47E+09	7.62E+09	0.742	6.762
4.75	2.82	81.17	59.21	2.285	8.67E+09	7.70E+09	1.554	8.333
4.54	2.77	81.17	61.08	2.248	8.58E+09	7.67E+09	1.277	7.780
4.15	2.72	83.17	65.47	2.262	8.41E+09	7.64E+09	0.878	7.061

Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C)	Presión atmosférica (kPa)	Calor latente de vaporización (MJ Kg)	Constante psicrométrica (kPa °C)	Velocidad del viento (m/s)	Presión de saturación de vapor (kPa)	Flujo térmico en el suelo (MJ m <sup>2</sup> día)	Evapotranspiración de referencia (mm/d)
$\Delta$	P	$\lambda$	$\gamma$	U <sub>2</sub>	es	G	Eto
0.203	101.12	2.439	0.068	1.267	3.51	0.00	3.695
0.202	101.12	2.439	0.068	1.267	3.49	-0.01	3.648
0.215	101.12	2.436	0.068	1.267	3.78	0.13	4.357
0.209	101.12	2.437	0.068	1.267	3.65	-0.05	4.157
0.200	101.12	2.439	0.068	1.267	3.44	-0.09	3.718

### ANEJO III

Metodología para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ETc mm/d) y programación de riego con estrategias de riego deficitario controlado.

Fase 1 (días)	60	Kcb ini	0.9	h ini (m)	3		Textura	Franco Arcillo Limoso
Fase 2	90	Kcb med	1	h med	3.5		F capacity (m3/m3)	0.32
Fase 3	120	Kcb fin	1	h fin	3.5		W capacity (m3/m3)	0.2
Fase 4	95						Z (m)	0.1
							AFE (mm)	9
Kcb Med Corregido	0.92			Kc min	0.1		AET (mm)	22
Kcb Fin Corregido	0.93			Fw (Aspersión)	1			

Fase	Kcb	h (m)	Kc max	Fc	Fw	1 - Fc	Few	De inicial
1	0.90	3.00	1.10	0.58	0.62	0.42	0.42	0.00
1	0.90	3.00	1.10	0.57	0.62	0.43	0.43	0.00
1	0.90	3.01	1.11	0.55	0.63	0.45	0.45	0.41
1	0.90	3.01	1.11	0.56	0.62	0.44	0.44	0.38
1	0.90	3.01	1.09	0.59	0.61	0.41	0.41	0.00

							Marco plantación	9	m2 (3m*3m)
							Diámetro de la copa	3	m
							Fracción de área sombreada	0.79	

Kr	Ke	Ke*Eto	De final	Kc	Etc mm/d	Transpiración mm/d	1090.18	872.14
1.00	0.20	0.73	0.00	1.10	4.06	3.33	Precipitación (mm/d)	Factor de precipitación efectiva (mm/d)
1.00	0.20	0.73	0.41	1.10	4.01	3.28	3.60	0.80
1.00	0.21	0.93	0.38	1.11	4.85	3.92	0.40	0.80
1.00	0.21	0.86	0.00	1.11	4.60	3.74	1.20	0.80
1.00	0.19	0.70	0.00	1.09	4.05	3.35	13.32	0.80
							1.63	0.80
								Precipitación efectiva (mm/d)
								2.88
								0.32
								0.96
								10.65
								1.31

Fracción agotamiento (p)			0.3			Tanto por uno		
Profundidad de raíces (zr)			0.5			m		
TAW			60			mm		
RAW			18			mm		

EA (Efic. Aplic)		75		%	
Cer (Cond. Ele. Real)		500		mmhos/cm	
Cemax (Cond. Ele. Max)		8000		mmhos/cm	
Cee (Cond. Ele. Sue)		1200		mmhos/cm	
Lr (Fracc. Lava)		0.091			

Dr inicial	Ks	Etc ajustado (NRn)	Dr final	Riego (mm)	Ntr (mm)	Tiempo riego (h)	Fase	Ya/Ym
		1467.36			1128.00			
0.00	0.91	3.68	3.68	0.00	0.00	0.00	1	
0.80	0.91	3.64	4.44	0.00	0.00	0.00	1	
4.12	0.91	4.40	8.52	0.00	0.00	0.00	1	
7.56	0.91	4.17	11.73	0.00	0.00	0.00	1	
1.08	0.91	3.67	4.75	0.00	0.00	0.00	1	

Aspersor	Xcell wobbler	Boquilla 9, a 20 PSI					
Caudal	600	l/h					
Diametro	14	m					
Marco	81	(9m*9m)					
Pluviometria	7.407407407	mm/h					
Riego deficitario			Fase	1	2	3	4
Fase 1	0.90684786		Ky	0.2	0.6	0.8	0.2
Fase 2	0.906389947						
Fase 3	0.870898721						
Fase 4	0.228812547						