



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 2

Neiva, 18 de abril de 2024

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

Leidy Yhohana Ortiz Pipi, con C.C. No. 1075291277

Autor(es) de la tesis titulada: Diseño de un Sistema de Riego por Microaspersión Aprovechando la Energía Solar como Alternativa Renovable, para el Cultivo de Limón Tahití en el Municipio de Natagaima (Tolima),

presentado y aprobado en el año 2024 como requisito para optar al título de: Ingeniera Agrícola;

Autorizo al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 2

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: _____

Leidy Yhohana Ortiz Pipi
C.C 1075291277



TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: Diseño de un Sistema de Riego por Microaspersión Aprovechando la Energía Solar como Alternativa Renovable, para el Cultivo de Limón Tahití en el Municipio de Natagaima (Tolima).

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Ortiz Pipi	Leidy Yhohana

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Bonilla Perdomo	Javier Eduardo

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniera agrícola

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Ingeniería Agrícola

CIUDAD: Neiva **AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2024 **NÚMERO DE PÁGINAS:** 30

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas___ Fotografías___ Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general___ Grabados___
Láminas___ Litografías___ Mapas___ Música impresa___ Planos_X_ Retratos___ Sin ilustraciones___
Tablas o Cuadros_X_

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento:

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



MATERIAL ANEXO:

PREMIO O DISTINCIÓN (*En caso de ser LAUREADAS o Meritoria*):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

Español

1. Riego localizado
2. Energía solar
3. Demanda hídrica
4. Bombeo solar
5. Alternativa energética

Inglés

1. Localized irrigation
2. Solar energy
3. Water demand
4. Solar pumping
5. Energy alternative

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Los cultivos para su óptimo desarrollo requieren frecuentemente la aplicación de agua en forma de riego, en algunas zonas la demanda de riego es mayor debido a las condiciones climáticas, tales como: escasas precipitaciones y altas temperaturas. En Colombia existen regiones en las cuales las precipitaciones anuales son inferiores a los 1500 mm, considerándose bajas en comparación con la mayor parte del territorio, en las cuales oscilan entre los 2000 a 4000 mm anuales, en el municipio de Natagaima (Tolima) la precipitación anual es de 1232 mm/año. En el presente trabajo se realiza el diseño de un sistema de riego localizado por microaspersión alimentado con energía solar fotovoltaica aprovechando las condiciones climáticas del municipio, el cual cuenta con uno de los valores de radiación solar más elevados del país (5.45 kWh/m/día), el sistema de riego suplirá los requerimientos hídricos del cultivo de limón Tahití, un cultivo con alta oportunidad de exportación funcionando con un arreglo fotovoltaico de 10 paneles solares junto con un banco de baterías con un periodo de recuperación de la inversión de 8 años frente a un sistema de riego con energía convencional.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

Crops for their optimal development frequently require the application of water in the form of irrigation, in some areas the demand for irrigation is higher due to climatic conditions, such as: low rainfall and high temperatures. In Colombia there are regions in which annual rainfall is less than 1500 mm, which is considered low in comparison with most of the territory, where it ranges from 2000 mm to 4000 mm per year, in the municipality of Natagaima (Tolima) the annual rainfall is 1232 mm/year. In the present work, the design of a localized micro-sprinkler irrigation system powered by photovoltaic solar energy is carried out, taking advantage of the climatic conditions of the municipality, which has one of the highest solar radiation values in the country (5.45 kWh/m²/day), the irrigation system will supply the water requirements of the Tahitian lemon crop, a crop with a high export opportunity operating with a photovoltaic array of 6 solar panels along with a



battery bank with a payback period of 8.7 years compared to an irrigation system with conventional energy.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado:

Firma:

Nombre Jurado: Johnny Mauricio Gutiérrez Marroquín

Firma:

Nombre Jurado: Oscar Eduardo Gutiérrez Olaya

Firma:

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO POR MICROASPERSIÓN
APROVECHANDO LA ENERGIA SOLAR COMO ALTERNATIVA
RENOVABLE, PARA EL CULTIVO DE LIMÓN TAHITÍ EN EL
MUNICIPIO DE NATAGAIMA (TOLIMA)**

Trabajo de grado presentado al departamento de Ingeniería Agrícola
como requisito para optar al título de: Ingeniera Agrícola

Autor

Leidy Yhohana Ortiz Pipi: Código: 20152143037

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Agrícola

Neiva, Huila, Colombia. 2023



Director: Javier Eduardo Bonilla Perdomo

Codirector:

Nota de aceptación



Jurado: Oscar Eduardo Gutiérrez Olaya



Jurado: Johnny Mauricio Gutiérrez
Marroquín

DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO POR MICROASPERSIÓN APROVECHANDO LA ENERGIA SOLAR COMO ALTERNATIVA RENOVABLE, PARA EL CULTIVO DE LIMÓN TAHITÍ EN EL MUNICIPIO DE NATAGAIMA (TOLIMA)

RESUMEN

Los cultivos para su óptimo desarrollo requieren frecuentemente la aplicación de agua en forma de riego, en algunas zonas la demanda de riego es mayor debido a las condiciones climáticas, tales como: escasas precipitaciones y altas temperaturas. En Colombia existen regiones en las cuales las precipitaciones anuales son inferiores a los 1500 mm, considerándose bajas en comparación con la mayor parte del territorio, en las cuales oscilan entre los 2000 a 4000 mm anuales, en el municipio de Natagaima (Tolima) la precipitación anual es de 1232 mm/año. En el presente trabajo se realiza el diseño de un sistema de riego localizado por microaspersión alimentado con energía solar fotovoltaica aprovechando las condiciones climáticas del municipio, el cual cuenta con uno de los valores de radiación solar más elevados del país (5.45 kWh/m²/día), el sistema de riego suplirá los requerimientos hídricos del cultivo de limón Tahití, un cultivo con alta oportunidad de exportación funcionando con un arreglo fotovoltaico de 10 paneles solares junto con un banco de baterías con un periodo de recuperación de la inversión de 8 años frente a un sistema de riego con energía convencional.

Palabras clave: riego localizado, energía solar, demanda hídrica, bombeo solar, alternativa energética.

ABSTRACT

Crops for their optimal development frequently require the application of water in the form of irrigation, in some areas the demand for irrigation is higher due to climatic conditions, such as: low rainfall and high temperatures. In Colombia there are regions in which annual rainfall is less than 1500 mm, which is considered low in comparison with most of the territory, where it ranges from 2000 mm to 4000 mm per year, in the municipality of Natagaima (Tolima) the annual rainfall is 1232 mm/year. In the present work, the design of a localized micro-sprinkler irrigation system powered by photovoltaic solar energy is carried out, taking advantage of the climatic conditions of the municipality, which has one of the highest solar radiation values in the country (5.45 kWh/m²/day), the irrigation system will supply the water requirements of the Tahitian lemon crop, a crop with a high export opportunity operating with a photovoltaic array of 6 solar panels along with a battery bank with a payback period of 8.7 years compared to an irrigation system with conventional energy.

Keywords: localized irrigation, solar energy, water demand, solar pumping, energy alternative.

INTRODUCCIÓN

El limón Tahití es uno de los cítricos más importantes a nivel comercial debido a su crecimiento en los últimos años a nivel internacional (García et al., 2021), en donde México es el principal productor y exportador a nivel mundial (Raddatz et al., 2019; Raddatz et al., 2021). En cuanto a Colombia, según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2020) y Bancolombia (2018) el área sembrada de cítricos es de 97.007 hectáreas, con un rendimiento de 15,2 toneladas/hectárea a 19 toneladas/ hectárea, el 26% corresponde al cultivo de limón siendo este producto el de mayor crecimiento en área sembrada en los últimos años y mayor oportunidad de exportación.

El cultivo de limón es un producto que genera empleo y desarrollo a las regiones, según Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2020) una hectárea de cultivo de limón Tahití genera dos empleos directos y tres empleos indirectos, aumentando al doble en época de cosecha, aunque el limón Tahití se abre cada vez más espacio en el mercado internacional, su producción todavía es baja, por ejemplo Estados Unidos importa apenas un 1% de limón Tahití Colombiano de su demanda total, por lo cual Colombia todavía no es competitivo aunque el mercado ya esté creado, por esto se debe expandir el área de siembra para atender la demanda mundial (Bancolombia, 2018).

Teniendo presente la demanda de limón Tahití sería una excelente opción impulsar a los pequeños productores para que incursionen en este mercado aprovechando las condiciones edafoclimáticas de la zona y buscando alternativas que permitan establecer el cultivo de forma económica y respetuosa con el medio ambiente, en este caso se pretende contribuir con una solución de un sistema de riego para el cultivo empleando energía solar fotovoltaica para el bombeo, lo que representará un ahorro económico al productor y le permitirá obtener cosechas de calidad.

Respecto a los sistemas de riego con energía solar fotovoltaica se han documentado varios trabajos como el de Martínez et al (2013) quienes diseñaron un sistema de riego automatizado alimentado con energía solar para responder a las necesidades de riego de una finca productora de aguacates en el municipio de Armero (Tolima) con el fin de contar con una solución sustentable que mejore la producción agrícola de este sector del país en el cual el abastecimiento de energía eléctrica es escaso pero se dispone del recurso hídrico y radiación solar suficientes para suplir las necesidades de orden agronómico, hidráulico y fotovoltaico.

Pedraza (2020) diseñó un sistema de riego fotovoltaico para la finca El Contador ubicado en el municipio de Viani (Cundinamarca) en una parcela experimental para el cultivo de limón, lo cual permitió evaluar la pertinencia del cultivo en la región y extender su producción, con este diseño se buscó reducir el consumo de energía eléctrica que tiene el sistema actual, reducir mano de obra y optimizar el uso del agua.

En este caso para el municipio de Natagaima (Tolima) el cultivo de limón ya ha sido considerado en el plan agropecuario del distrito de riego Triángulo del Tolima elaborado por IICA (2014) por el fuerte arraigo y tradición a este cultivo por parte de la comunidad, debido a que la zona de estudio la vereda Balsillas se encuentra fuera del área de influencia del proyecto Triángulo del Tolima se debe plantear una solución individual con fuentes de energía alternativas como lo menciona el Plan Nacional de Riego 2020-2039 (MADR, 2020).

MATERIALES Y MÉTODOS

Balance hídrico y determinación de requerimientos hídricos del cultivo.

Para realizar el balance hídrico y calcular el requerimiento hídrico del cultivo de limón Tahití se requirió información de variables climatológicas de la red de estaciones del INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEAM. se seleccionaron las estaciones de acuerdo al radio de acción promedio teniendo en cuenta el tipo de estación según la sugerencia técnica de la Organización Meteorológica Mundial – WMO (1970).

Tabla 1. Estaciones seleccionadas para la descarga de variables climáticas.

CÓDIGO IDEAM	NOMBRE	TIPO ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD	VARIABLE	DISTANCIA AL AREA DE ESTUDIO (km)
21110090	POTOSÍ	Pluviométrica	3.3871	-75.2184	Precipitación	3.14
21145040	SAN ALFONSO	Pluviométrica	3.3733	-75.1101	Precipitación	7.54
21110290	LA VICTORIA	Pluviométrica	3.3495	-75.1703	Precipitación	7.31
21130180	ALTAMIRA	Pluviométrica	3.4536	-75.1508	Precipitación	4.62
	ANCHIQUE	Climatológica Principal	3.5738	-75.109	- Temperatura Máxima - Temperatura mínima	18.9
21145040	SAN ALFONSO	Agro meteorológica	3.3733	-75.1101	- Temperatura Máxima - Temperatura mínima	7.54
21115060	SAN JOSÉ	Climatológica Ordinaria	3.3292	-75.1840	- Temperatura Máxima - Temperatura mínima	9.68
21115080	VILLAVIEJA	Climatológica Ordinaria	3.1830	-75.2475	- Temperatura Máxima - Temperatura mínima	27.01
2145040	SAN ALFONSO	Agro meteorológica	3.3733	-75.1101	Evaporación	7.54

A las estaciones seleccionadas se les estimó el porcentaje de datos faltantes para cada una de las estaciones y se realizó el completamiento con el método del U.S National Weather Service o el cuadrado inverso de la distancia de acuerdo a la ecuación 1.

(1)

$$P_x = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i * W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

$$W_i = \frac{1}{D_i^2}$$

Donde:

P_x = dato perdido para el día, mes o año en la estación x.

P_i = dato existente en la estación i para el mismo día, mes o año (mínimo dos estaciones).

D_i = distancia entre cada estación i y la estación del dato perdido.

La radiación extraterrestre (R_a) se estimó a partir de la ecuación 2 y se calculó la evapotranspiración de referencia (ET_0) con la metodología de Hargreaves (1983) ecuación 2, la cual de acuerdo a IDEAM (2017) junto con la metodología de Penman-Monteith es la más acertada para la zona pluviométrica Alto Magdalena y Alto Cauca.

(2)

$$R_a = \frac{24 * 60}{\pi} * G_{sc} * d_r * [W_s * \sin(\varphi) * \sin(\delta) + \cos(\varphi) * \cos(\delta) * \sin(W_s)]$$

Donde:

R_a = Radiación extraterrestre ($MJ/m^2 * día$)

G_{sc} = Constante solar = 0.082 ($MJ/m^2 * min$)

d_r = Distancia relativa inversa tierra – sol

W_s = Angulo de radiación a la puesta del sol (rad)

φ = latitud (rad), positivo hemisferio norte y negativo para hemisferio sur.

δ = declinación solar (rad)

(3)

$$ET_0 = 0.0023 * (T_{med} + 17.78) * R_0 * (T_{max} - T_{min}) * 0.5$$

Donde:

T_{med} = Temperatura media

R_0 = Radiación en el tope de la atmósfera

T_{max} = Temperatura máxima

T_{min} = Temperatura mínima

La evapotranspiración del cultivo se estimó a partir de la ecuación 3, con el coeficiente de cultivo K_c de valores típicos para cítricos según (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998), los valores de K_c en las diferentes etapas de desarrollo del cultivo se muestran en la figura 1.

(4)

$$Et_c = K_c * Et_o$$

Donde:

K_c = Coeficiente del cultivo

Et_o = Evapotranspiración de referencia

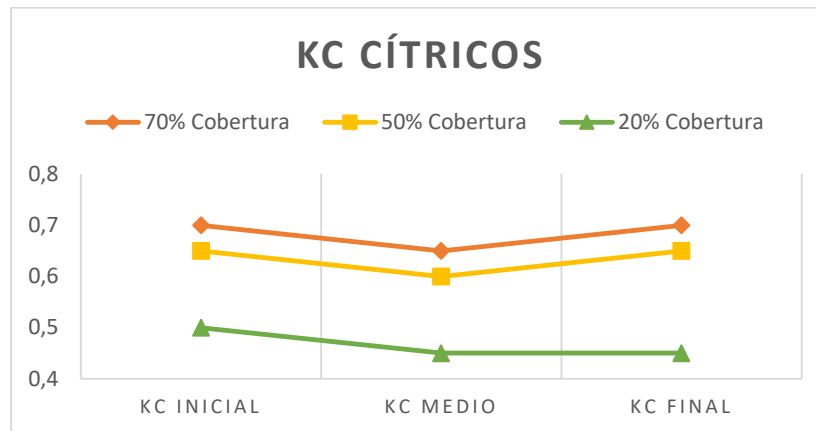


FIGURA 1. Valores típicos de K_c para el cultivo de cítricos sin cobertura del suelo y distintos porcentajes de suelo cubiertos por el dosel del árbol. Los valores menores de K_c Medio son debidos al cierre estomático durante los periodos de máxima ET. Fuente: (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998)

Diseño agronómico

Para el diseño agronómico se realizó análisis de suelos para determinar las propiedades hidro físicas tales como capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), densidad aparente (D_a), densidad real, (D_r), textura y porosidad, las muestras se tomaron a dos profundidades distintas en tres puntos de muestreo, se realizó prueba de infiltración por anillos y junto con los datos de marco de plantación se realizó el diseño agronómico en el cual se calculan las necesidades de agua y se determina la dosis, frecuencia y tiempo de riego, número de emisores por planta y caudal del emisor.

Diseño hidráulico empleando energía solar fotovoltaica como alternativa renovable.

Para el diseño hidráulico se realizó el levantamiento topográfico planimétrico y altimétrico mediante estación total y elaboración de curvas de nivel con el software AutoCAD civil 3D 2023, se realizaron los cálculos para determinar el caudal del sistema, número de unidades operacionales, pérdidas por fricción en las tuberías (principal, secundaria, terciaria y laterales), presión requerida en el sistema y selección de equipos: bombas, filtros, diámetro de tuberías, accesorios y emisores siguiendo la metodología de Elizondo (1991) de igual manera se realizó simulación hidráulica con el software EPANET para las condiciones de funcionamiento de cada uno de los turnos de riego.

El cálculo de la pérdida de carga continua se realizó a partir de la fórmula de Darcy – Weisbach, la cual expresa:

(5)

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} * 10^3$$

Donde:

h_f = pérdida de carga continua en m

f = factor de rozamiento, el cual depende del régimen de flujo de la tubería.

L = longitud de la tubería en m

D = diámetro interior en mm

V = velocidad del flujo en la tubería en m/s

g = aceleración de la gravedad en m/s^2

Para diámetros iguales o menores de 125 mm y cuando $10^5 < Re < 10^7$ se recomienda la fórmula:

(6)

$$J = 7.89 * 10^7 * \frac{Q^{1.75}}{D^{4.75}}$$

Donde:

J = pérdida de carga unitaria $\left(\frac{m}{100m}\right)$

Q = caudal en la tubería en lps

L = longitud de la tubería en m

En los laterales, la conexión de los emisores produce una pérdida de carga, la cual se puede expresar como una longitud equivalente en el lateral de la siguiente manera:

(7)

$$J' = J * \frac{S_e + f_e}{S_e}$$

Donde:

J' = pérdida de carga unitaria corregida por las pérdidas de la conexión de emisor $\left(\frac{m}{100m}\right)$

f_e = longitud equivalente del lateral

S_e = separación entre emisores en m

En tuberías terciarias para la aplicación de la fórmula se considera como salidas la conexión de los laterales.

Por lo tanto, para el cálculo de la pérdida de carga (h_f) de una tubería lateral o terciaria se utiliza la expresión:

(8)

$$h_f = J' * F * \frac{l}{100}$$

Donde:

J' = pérdida de carga unitaria corregida por las pérdidas de la conexión de emisor $\left(\frac{m}{100m}\right)$

F = factor de Christiansen

l = longitud del lateral o la terciaria en m

Diseño fotovoltaico

Para el diseño fotovoltaico se obtuvieron datos de radiación a través de la herramienta Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), se realizaron los cálculos mencionados por Martínez et al (2013) y Mossande et al (2015) para determinar: la energía requerida por el generador fotovoltaico, el área requerida para el arreglo fotovoltaico, la potencia del generador fotovoltaico, la potencia pico del arreglo fotovoltaico, número de paneles fotovoltaicos y la selección de los equipos apropiados.

Presupuesto para la implementación del sistema de riego

Con la selección de los equipos requeridos se realizó el presupuesto para la implementación del sistema de riego para una hectárea de cultivo, teniendo en cuenta los precios actuales de los materiales, equipos y mano de obra requerida.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evapotranspiración de referencia ETo

A continuación, en la figura 2 se presenta los valores de ETo a nivel mensual.

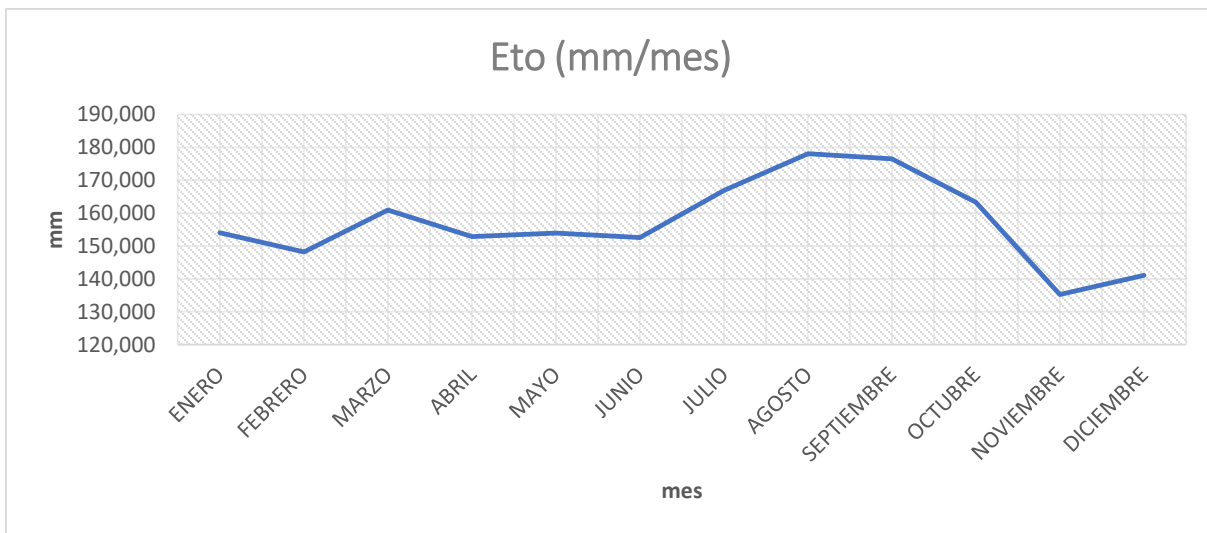


FIGURA 2. ETo a escala mensual por el método de Hargreaves.

En la figura 3 podemos observar los valores de ETo calculado por distintas metodologías para la zona pluviométrica Alto Magdalena y Alto Cauca en las estaciones APTO PERALES IBAGUÉ y APTO BENITO SALAS NEIVA.

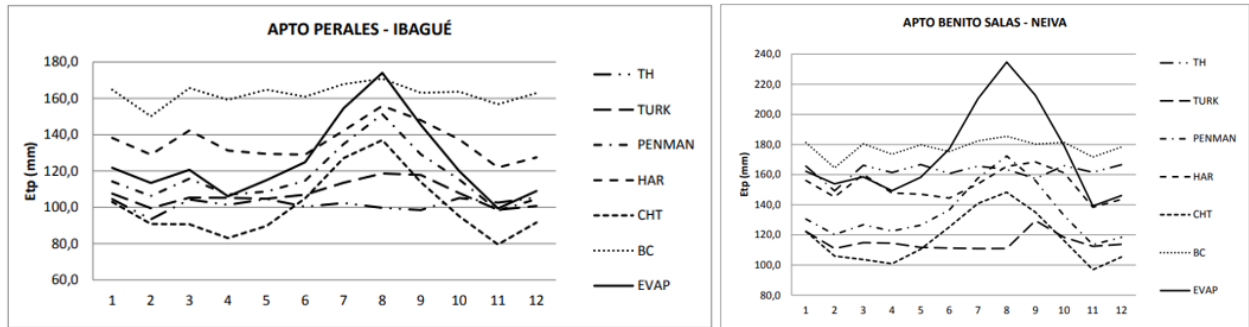


FIGURA 3. Valores de ETo para la estación Apto Perales – Ibagué y para la estación Apto Benito Salas – Neiva de acuerdo a IDEAM (2017)

De la figura 2 se puede observar que el mes de mayor ETo corresponde al mes de agosto con una ETo de 178 mm/mes equivalente a 5.93 mm/día, de igual manera en la figura 3 se puede verificar este resultado con los valores de ETo calculados por el IDEAM bajo distintas metodologías.

Balance hídrico y determinación de requerimientos hídricos del cultivo.

A continuación, en la figura 4 se presenta el balance para la zona de estudio en detalle mensual multianual, evidenciando la necesidad de riego durante el 75% del año exceptuando algunos meses como abril, noviembre y diciembre para el correcto desarrollo del cultivo de cítricos.

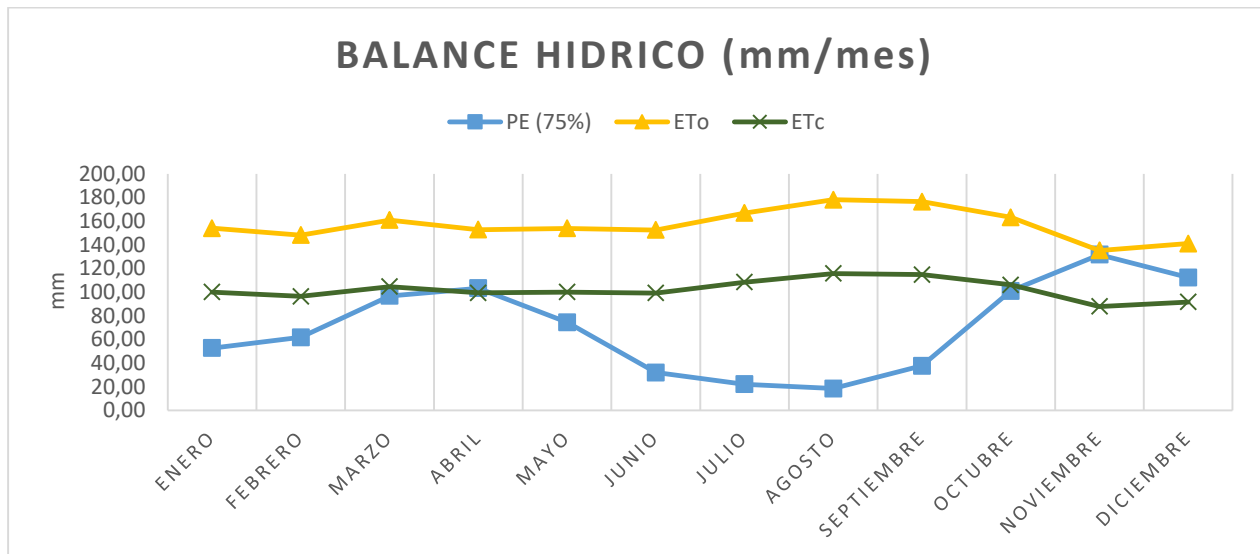


FIGURA 4. Balance ETo vs precipitación y balance para el cultivo de cítricos (ETc vs precipitación) en frecuencia Mensual.

De acuerdo a lo anterior para el diseño se considerará ETC de 3.85 mm/día la cual corresponde al mes de máxima demanda es decir agosto con un coeficiente de cultivo Kc de 0.65.

Diseño agronómico

Tabla 2. Resultados del diseño agronómico

DISEÑO AGRONÓMICO				
Dosis de Riego	$D_r = \frac{(CC - PMP)}{100} * (1 - PC) * D_a * Z * \frac{P}{100}$			
	Profundidad de la muestra		Unidad	Observaciones
	0 cm - 40 cm	40 cm - 80 cm		
Capacidad de campo (CC)	23.80	21.68	%	*Resultados de laboratorio
Punto de marchitamiento permanente (PMP)	13.98	10.41	%	
Humedad aprovechable (PC)	0.65	0.65	Decimal	*35% de la humedad aprovechable
Densidad aparente (Da)	1.43	1.51	*Adimensional	*Resultados de laboratorio
Profundidad de raíz (Z)	400.00	400.00	mm	
Porcentaje de area humedecida (P)	40.00	40.00	%	*se asume 40% del marco de plantacion
Agua a reponer (Dr)	7.86	9.53	mm	
Dosis de riego Máxima (Dr)	17.39		mm	*sumatoria de las láminas de riego a las dos profundidades calculadas
Evapotranspiración del cultivo (Etc)	$E_{Tc} = E_{to} * K_c$			
Evapotranspiración de referencia (Eto)	5.93	mm/d		
Coefficiente de cultivo (Kc)	0.65			
Evapotranspiración del cultivo (Etc)	3.85	mm/d		
Necesidad neta	$N_n = E_{Tc} * K_l * K_{rl}$			
Coefficiente de localización Promedio (Kl)	0.56			
Porcentaje de área a humedecer (A)	0.40	*Adimensional	*Se asume el 40% del marco de plantación	
Kl1 (Aljibi et al, 1974)□	0.54		$K_{l1} = 1.34 * A$	
Kl2 (Decroix)	0.50		$K_{l2} = 0.1 + A$	
Kl3 (Hoare et al, 1974)	0.70		$K_{l3} = A + 0.5 * (1 - A)$	
Kl4 (Keller, 1978)	0.49		$K_{l4} = A + 0.15 * (1 - A)$	
Necesidad neta (Nn)	2.57			
Coefficiente de corrección por variaciones climáticas y advección	$K_{rl} = K_{cl} * K_{adv}$			
Coefficiente de variación climática (Kcl)	1.2	Adimensional	*Valores de 1.15 a 1.20	
Coefficiente por advección (Kadv)	1	Adimensional	*Basados en el área del predio y el tipo de cultivo	
Coefficiente de corrección por variaciones climáticas y advección (Krl)	1.2	Adimensional		

	$N_b = \frac{N_n}{1 - K * CU}$		
Necesidad bruta			
Eficiencia de aplicación (Ea)	95	%	*Eficiencia de riego para microaspersión.
K	0.05		$K = 1 - Ea$
Coefficiente de uniformidad (CU)	97.9	%	*Ver cálculo de coeficiente de uniformidad
Necesidad bruta (Nb)	2.77	mm/d	
			$I_R = \frac{D_r}{N_b}$
Intervalo de riego	6.28	dias	
Intervalo de riego ajustado	6.00	dias	
Dosis de riego máxima a IR	16.61	mm	
	$I_A = \frac{Q_{masp}}{A_h}$		
Intensidad de aplicación del emisor			
Caudal del microaspersor (Qmasp)	0.02	l/s	* NaamDanJain AQUASMART 2002 Boquilla verde, rotor naranja.
Radio húmedo del microaspersor	3.50	m	
Area húmeda del microaspersor (Ah)	38.48	m ²	
Intensidad de aplicación del emisor	1.48	mm/h	
Velocidad de Infiltración	11.00	mm/h	*Velocidad de infiltración suelo
Chequeo $I_A \leq V_{infiltración}$	OK		
			$T_R = \frac{D_R}{I_A}$
Tiempo de riego	11.24	h	
Numero de sectores de riego	6.00	Und	*6 sectores de riego con dos válvulas por sector
Tiempo total de riego	67.41	h	
Jornada de operación	12.00	h	
Numero de sectores regados/dia	1.00	sector	
Frecuencia comprobada	6.00	dias	Comprobar que: $F_R \leq I_R$

Diseño hidráulico empleando energía solar fotovoltaica como alternativa energética.

LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO.

En la figura 5 se presenta la topografía del terreno, en la cual se observa la pendiente N-S de 0,01% y la pendiente E-W DE 0,6% dentro del predio.

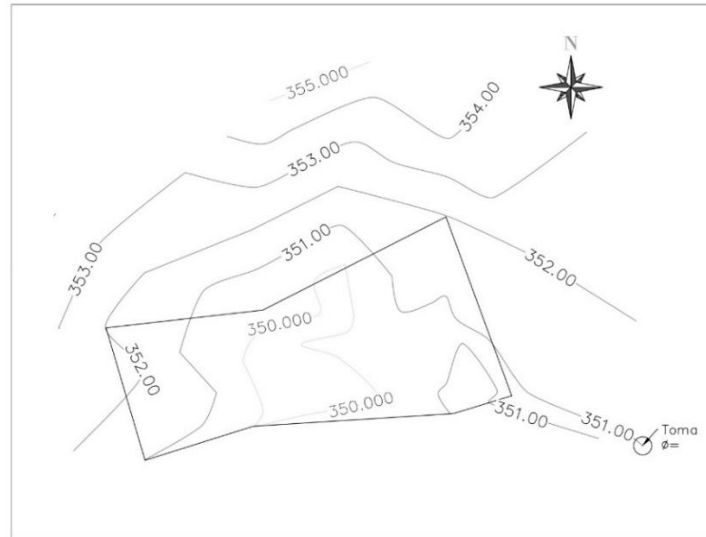


FIGURA 5. Topografía del terreno y principales puntos para la elaboración del diseño.

COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD Y COEFICIENTE DE VARIACIÓN:

El emisor seleccionado es el microaspersor NAANDANJAIN AQUASMART 2002 el cual entre sus principales características ofrece un flujo constante entre presiones de 1.5 a 4 bar, es decir es un emisor autocompensado. El cálculo del coeficiente de uniformidad se realizó conforme la ecuación 9 siguiendo la metodología de Elizondo (1991).

(9)

$$CU = \frac{q_{25\%}}{\bar{q}} * 100$$

Donde:

$q_{25\%}$ = Caudal medio de la cuarta parte inferior, en lph

\bar{q} = Caudal medio, en lph

El valor del coeficiente de variación se obtiene despejando C_v a partir de la ecuación propuesta por Karmeli y Keller (1975):

(10)

$$C_U = 100 * \left(1 - \frac{1.27 * C_V}{\sqrt{e}} \right) * \frac{q_{min}}{\bar{q}}$$

Donde:

C_U = Coeficiente de uniformidad en %

C_v = Coeficiente de variación del emisor en su proceso de fabricación en decimal

e = Número de emisores por planta

q_{min} = Caudal que da el emisor que funciona más desfavorable en lph

\bar{q} = Caudal medio de los emisores en lph

De los valores de caudal arrojados en la prueba de los emisores y a partir de las ecuaciones 9 y 10 se obtuvieron los datos presentados en la tabla 3.

Tabla 3. Valores de coeficiente de uniformidad (CU) y variación (Cv) del emisor.

Q PROMEDIO:	56.8
Q PROMEDIO 25%:	55.6
COEF. UNIFORMIDAD:	97.9
COEF. VARIACION	0.02

De acuerdo a Goldberg (1974) los emisores se pueden clasificar de acuerdo a su coeficiente de variación como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Clasificación de los emisores de acuerdo al coeficiente de variación (Cv).

Rango	Clasificación
$C_v \leq 0.04$	Excelente
$0.04 < C_v \leq 0.07$	Medios
$0.07 < C_v \leq 0.1$	Marginales
$0.11 < C_v \leq 0.15$	Deficientes
$C_v \leq 0.15$	Generalmente inaceptables

De acuerdo a Merriam y Keller (1978) los emisores se pueden clasificar de acuerdo a su coeficiente de uniformidad C_u de acuerdo a los siguientes valores:

Tabla 5. Clasificación de los emisores de acuerdo al coeficiente de uniformidad (C_u).

Rango	Clasificación
90% - 100%	Excelente
80% - 90%	Bueno
70% - 80%	Aceptable
< 70%	Inaceptable

Según los valores de la tabla 3, se puede observar que los emisores se pueden clasificar como excelentes tanto en coeficiente de variación como en coeficiente de uniformidad, lo cual repercute en una aplicación uniforme del agua para riego en todo el terreno.

PÉRDIDA DE CARGA PERMISIBLE EN LA SUBUNIDAD.

De acuerdo a Elizondo (1991) se puede definir la pérdida de carga permisible en la subunidad como el 20% de la carga de operación del emisor (H_o).

Tabla 6. Pérdida de carga permisible en el lateral y en la tubería terciaria.

PERDIDA DE CARGA EN LA SUBUNIDAD	5.54
PERDIDA PERMISIBLE EN EL LATERAL	2.77
PERDIDA PERMISIBLE EN LA Terciaria	2.77

DISEÑO HIDRÁULICO DEL LATERAL.

Tabla 7. Diseño hidráulico del lateral.

DISEÑO HIDRÁULICO			
Pérdida de carga unitaria (m/100m)	$J = 7,89 * 10^7 * \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}}$		
Lateral			
		Unidad	Observaciones
Caudal en la tubería (Q)	0.0628	l/s	*Considerando 4 emisores por lateral.
Diámetro tubería (D)	12	mm	*Diámetro asumido
Perdida de carga unitaria (J)	4.65	m/100m	
Pérdida de carga unitaria corregida (m/100m)	$J' = J * \frac{S_e + f_e}{S_e}$		
Perdidas por conexión del emisor (fe)	0.15	m	
Separación entre emisores (Se)	4	m	*De acuerdo al marco de plantación
Perdida de carga unitaria (J)	4.65	m/100m	
Perdida de carga unitaria corregida (J')	4.82	m/100m	
Pérdida de carga en la tubería	$h_f = J' * F * \frac{L}{100}$		
Perdida de carga unitaria corregida (J')	4.82	m/100m	
Factor de Christiansen (F)	0.426		*Para B=1.75 y 4 salidas a L/2
Longitud del lateral (L)	14	m	*Considerando 4 emisores por lateral y el primero situado a L/2.
Pérdida de carga en la tubería (hf)	0.29	m	*Ver pérdida de carga permisible en la subunidad
Presión a la entrada del lateral	$h_l = \bar{h} + \frac{3}{4} h_f + \frac{1}{2} \Delta E_l$		
Carga media de operación del emisor (h)	27.68	m	*Ver catálogo del emisor.
Pérdida de carga en la tubería (hf)	0.29	m	
Diferencia de cotas en los extremos de la tubería (ΔE_l)	0.14		*Diferencia de cotas del 1m en la condición mas desfavorable, ver plano.
Presión a la entrada del lateral (hl)	27.97	m	

DISEÑO HIDRÁULICO DE LA TUBERÍA TERCIARIA

Tabla 8. Diseño hidráulico de la tubería terciaria.

DISEÑO HIDRÁULICO			
Pérdida de carga unitaria (m/100m)	$J = 7,89 * 10^7 * \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}}$		
Terciaria			
		Unidad	Observaciones
Caudal en la tubería (Q)	0.628	l/s	*Considerando 10 laterales por terciaria.
Diámetro tubería (D)	18.74	mm	*Diámetro asumido PVC 1/2" RDE 21
Perdida de carga unitaria (J)	31.47	m/100m	
Pérdida de carga unitaria corregida (m/100m)	$J' = J * \frac{S_e + f_e}{S_e}$		
Perdidas por conexión del emisor (fe)	0.15	m	
Separación entre laterales (Se)	6	m	*De acuerdo al marco de plantación
Perdida de carga unitaria (J)	31.47	m/100m	
Perdida de carga unitaria corregida (J')	32.25	m/100m	
Pérdida de carga en la tubería	$h_f = J' * F * \frac{L}{100}$		
Perdida de carga unitaria corregida (J')	32.25	m/100m	
Factor de Christiansen (F)	0.409		*Para B=1.75 y 4 salidas a L/2
Longitud del lateral (L)	30	m	*Considerando 10 laterales, situados 5 laterales a cada lado.
Pérdida de carga en la tubería (hf)	3.96	m	*Ver pérdida de carga permisible en la subunidad
Presión a la entrada de la terciaria	$h_T = \bar{h} + \frac{3}{4} h_f + \frac{1}{2} \Delta E_l$		
Presión a la entrada del lateral (h)	27.97	m	*Ver catálogo del emisor.
Pérdida de carga en la tubería (hf)	3.96	m	
Diferencia de cotas en los extremos de la tubería (ΔE_l)	0.01		*Diferencia de cotas del 1m en la condición mas desfavorable, ver plano.
Presión a la entrada de la terciaria (hT)	30.94	m	

DISEÑO HIDRÁULICO DE LA TUBERÍA SECUNDARIA Y PRINCIPAL

De acuerdo a Elizondo (1991) existen varios métodos para seleccionar los diámetros de las tuberías secundaria y principal, los cuales se basan en límites de carga permisible, límite de velocidad o comparación de costos, en el presente trabajo se toma como criterio el límite de velocidad como se presenta a continuación.

Tabla 9. Diseño hidráulico de la tubería secundaria y principal.

DISEÑO HIDRÁULICO			
Pérdida de carga unitaria (m/100m)	$J = 7,89 * 10^7 * \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}}$		
Secundaria			
		Unidad	Observaciones
Caudal en la tubería (Q)	0.628	l/s	*Considerando 10 laterales por terciaria.
Diámetro tubería (D)	30.4	mm	*Diámetro asumido PVC 1" RDE 26
Perdida de carga unitaria (J)	3.16	m/100m	
Pérdida de carga (m)	$h_s = J * \frac{L}{100}$		
Perdida de carga unitaria (J)	3.16	m/100m	
Longitud de la secundaria (L)	32.00	m	
Perdida de carga por fricción (hs)	1.01	m	
Velocidad permisible	$V = \frac{Q}{A}$		
Caudal en la tubería (Q)	0.000628	m3/s	*Considerando 10 laterales por terciaria.
Area de la sección transversal (A)	0.00073	m2	
Velocidad permisible (V)	0.87	m/s	*Criterio: $V \leq 2$ (m/s)
Pérdida de carga unitaria (m/100m)	$J = 7,89 * 10^7 * \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}}$		
Principal			
		Unidad	Observaciones
Caudal en la tubería (Q)	1.256	l/s	*Considerando 10 laterales por terciaria.
Diámetro tubería (D)	44.56	mm	*Diámetro asumido PVC 1-1/2" RDE 26
Perdida de carga unitaria (J)	1.73	m/100m	
Pérdida de carga (m)	$h_p = J * \frac{L}{100}$		
Perdida de carga unitaria (J)	1.73	m/100m	
Longitud de la principal (L)	242.00	m	
Perdida de carga por fricción (hp)	4.18	m	
Velocidad permisible	$V = \frac{Q}{A}$		
Caudal en la tubería (Q)	0.001256	m3/s	*Considerando 10 laterales por terciaria.
Area de la sección transversal (A)	0.00156	m2	
Velocidad permisible (V)	0.81	m/s	*Criterio: $V \leq 2$ (m/s)

A continuación, se presenta el diseño del sistema de riego por microaspersión con el dimensionamiento realizado en el diseño hidráulico.

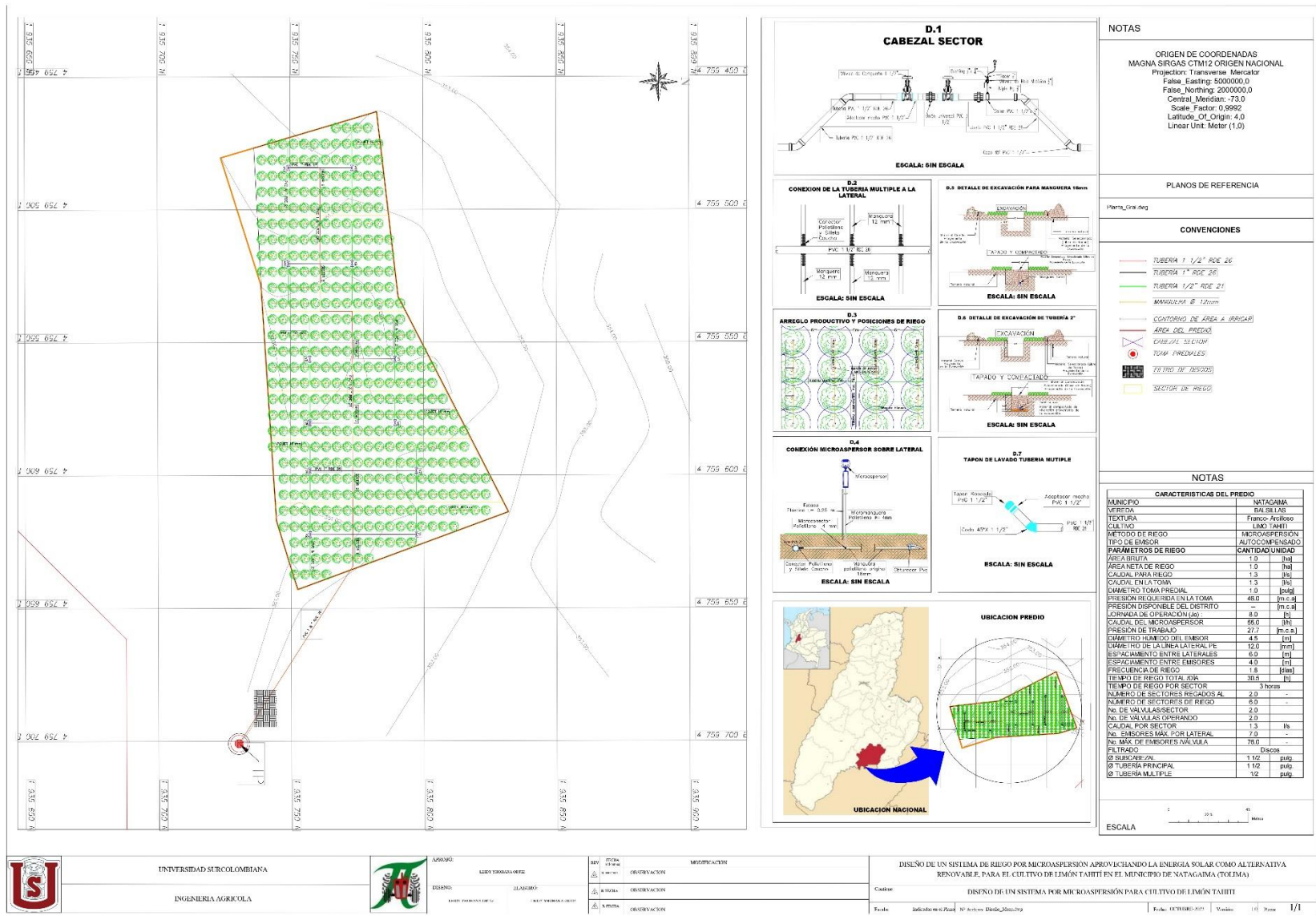


FIGURA 6. Diseño de sistema de riego por microaspersión para el cultivo de Limón Tahiti.

TURNOS DE RIEGO

A continuación, se presentan las válvulas que entrarían en funcionamiento durante cada turno de riego con el objetivo de realizar un riego uniforme, de acuerdo al diseño podrán funcionar dos válvulas por turno de riego de la siguiente manera:

Tabla 10. Válvulas en operación por turno de riego.

TURNO	VÁLVULAS
Día 1	V1 – V2
Día 2	V3 – V4
Día 3	V5 – V6
Día 4	V7 – V8
Día 5	V9 – V10
Día 6	V11 – V12

SIMULACIÓN HIDRÁULICA.

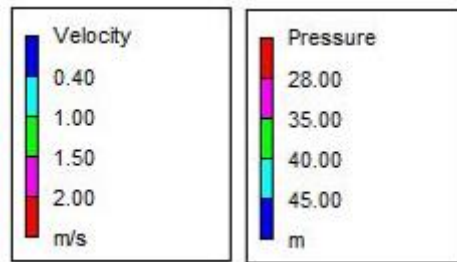
Por medio de Epanet podemos evaluar el flujo del agua en las tuberías, como la velocidad y las presiones en los nodos, permite una visualización gráfica con colores sobre la red o numérica mediante tablas. En el presente trabajo se realizaron simulaciones para los 6 turnos de riego en las cuales se presentan los valores tanto gráficos como numéricos.

Tabla 11. Valores de presión disponible en cada una de las válvulas durante cada turno de riego

VALVULAS ID	PRESIÓN (mca)					
	TURNO 1	TURNO 2	TURNO 3	TURNO 4	TURNO 5	TURNO 6
V1	36.87	34.78	38.19	35.42	34.95	37.04
V2	37.15	34.97	38.38	35.61	35.13	37.22
V3	37.49	33.18	38.03	34.98	34.45	36.75
V4	37.85	34.34	38.38	35.33	34.81	37.11
V5	38.14	34.92	38.07	35.08	34.51	37.00
V6	38.44	35.22	38.47	35.38	34.81	37.30
V7	38.50	35.27	38.73	34.42	34.19	36.89
V8	39.36	36.14	39.60	35.16	35.05	37.75
V9	38.30	35.08	38.54	34.61	31.92	35.56
V10	37.92	34.7	38.15	34.23	31.67	35.18
V11	37.06	33.84	37.29	33.37	31.09	33.42
V12	36.99	33.77	37.23	33.30	31.03	33.43

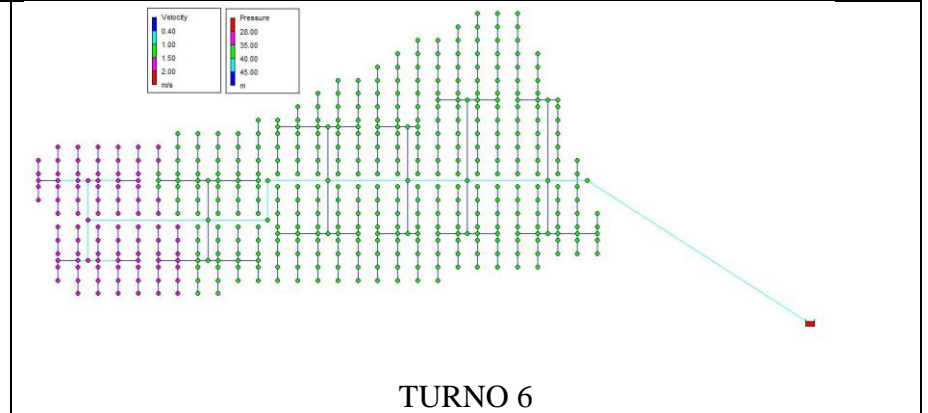
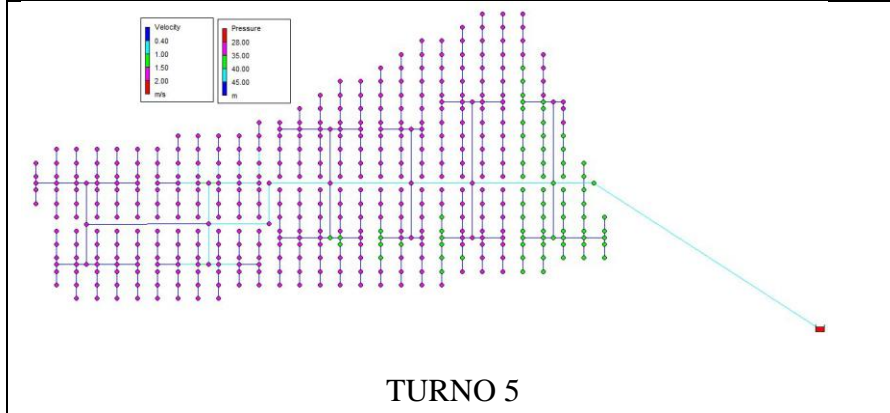
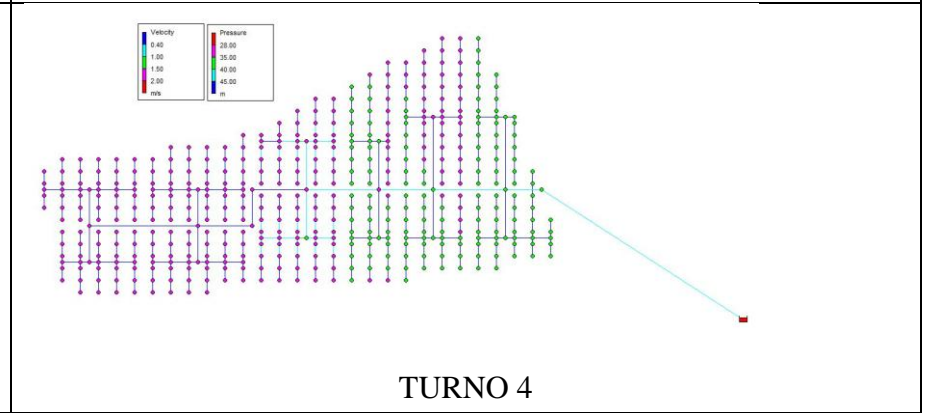
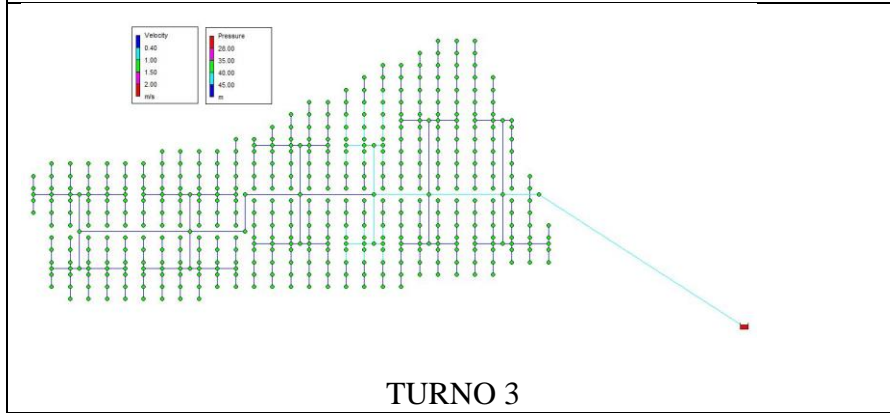
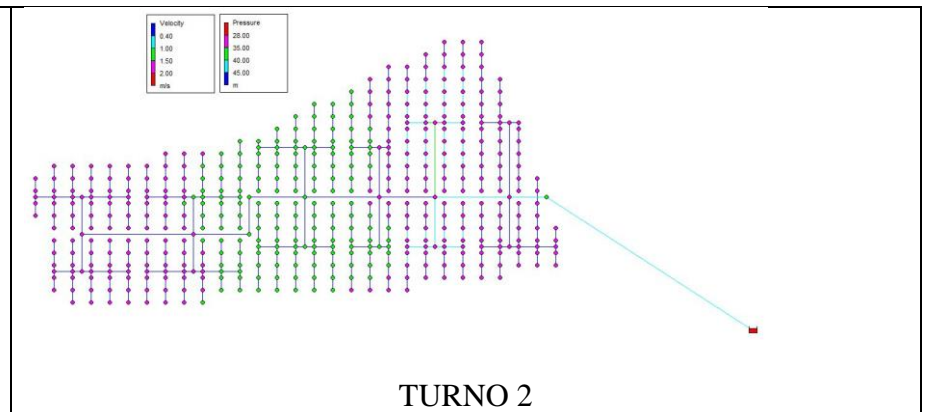
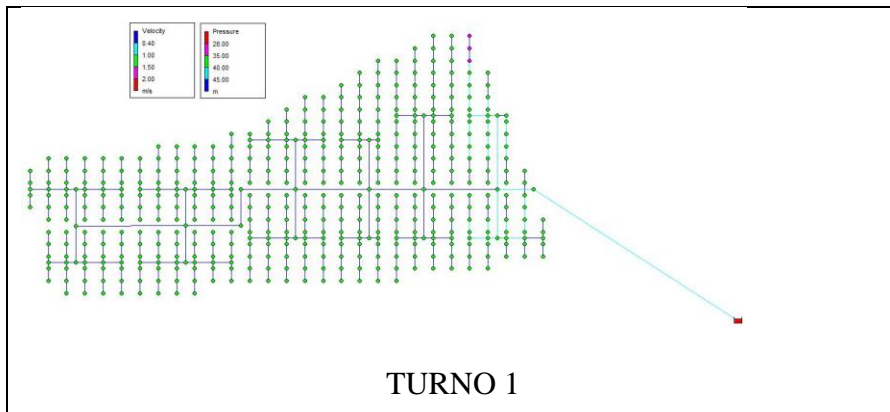
En la tabla 11 se puede observar que la presión disponible en las válvulas es superior a la presión requerida hallada en la tabla 8 de 30.94 mca para el correcto funcionamiento de todo el sistema.

A continuación, se presentan los resultados gráficos de las simulaciones realizadas para los 6 turnos de riego los cuales operan como se presentó en la tabla 10. La escala de colores de los resultados para velocidad y presión son los siguientes:



La presión mínima requerida por el microaspersor es de 28 mca y los rangos de velocidad son de mínimo 0.4 m/s y máximo 2 m/s en tuberías principal y secundarias.

Los demás resultados numéricos (tablas) de las simulaciones por cada turno de riego tales como velocidad en todas las tuberías y presiones en todos los nodos se encuentran como anexos al presente documento:



SELECCIÓN DE LA BOMBA

Tabla 12. Cálculos de selección de la bomba.

SELECCIÓN DE LA BOMBA			
Pérdidas menores	$h_L = K * \left(\frac{V^2}{2g} \right)$		
Codo 45° PVC	0.013	m	*Valores de K de acuerdo a Manual del usuario V. 2.00.12 EPANET
Tee estandar - flujo recto	0.238	m	
Válvula de globo abierta	4.579	m	
Codo 90° PVC	0.053	m	
Filtro de malla plástica	4.22	m	
Pendiente del terreno	0.010	m	
Carga que debe vencer la bomba	$H_B = H_T + \sum H_{fs} + \sum H_{fp} + \sum H_{fLoc} \pm \Delta EL$		
Carga requerida a la entrada de la terciaria	30.94	m	
Pérdidas por fricción en la tubería secundar	1.01	m	
Pérdidas por fricción en la tubería principal (4.18	m	
Suma de perdidas localizadas (Hfloc)	4.88	m	
Diferencia de cotas entre extremos de tuber	0.010	m	
Unidad de filtrado	4.22	m	
Carga que debe vencer la bomba (HB)	45.25	m	
Carga que debe vencer la bomba (HB)	46.00	m	
Potencia requerida en la bomba	$P_B = \frac{Q * H_B}{76 * E_b}$		
Caudal de la bomba (Q)	1.256	l/s	
Carga que debe vencer la bomba (HB)	46.00	m	
Eficiencia de la bomba (Eb)	0.80	decimal	
Potencia requerida en la bomba (PB)	0.95	HP	
Potencia del motor	$P_m = \frac{Q * H_B}{76 * E_b * E_m}$		
Caudal de la bomba (Q)	1.256	l/s	
Carga que debe vencer la bomba (HB)	46.00	m	
Eficiencia de la bomba (Eb)	0.80	decimal	
Eficiencia del motor (Em)	0.80	decimal	
Potencia del motor (Pm)	1.19	HP	
Potencia del motor corregida (Pm)	1.40	HP	*Considerando una potencia extra de 15% para compensar el desgaste por uso frecuente y realización de lavados.
Datos para la curva característica de la bomba			
Caudal en la tubería (Q)	1.30	l/s	
Caudal en la tubería (Q)	21.00	GPM	
Carga que debe vencer la bomba (HB)	46.00	m	

De acuerdo a la tabla 12. La bomba requerida debe manejar una altura (ADT) máxima de 46 metros y un caudal máximo de 21 GPM, con estos datos se ingresa a la curva característica de la bomba y se identifica el cumplimiento de los requisitos. La potencia del motor indica la potencia mínima requerida en la bomba la cual permitirá calcular la energía necesaria para el sistema de bombeo.

Debido a que en el mercado se encuentran diferentes electrobombas que se ajustan a los valores requeridos, el criterio para la selección de la bomba será el menor precio y la menor potencia la cual va a repercutir en una menor demanda energética.

Diseño fotovoltaico

CANTIDAD DE RADIACIÓN EN LA ZONA DE INSTALACIÓN

En la tabla 13 y 14 se presentan los datos mensuales de radiación para un periodo de 10 años (2005-2015) tanto en un plano horizontal como en una superficie con la inclinación óptima, en este caso 4° de acuerdo a la herramienta PVGIS, de acuerdo a diversos autores los paneles se deben orientar en una inclinación cercana a la latitud local en este caso 3.42° la cual se aproxima a 4° como lo sugiere la herramienta.

Tabla 13. Datos mensuales de radiación en un plano horizontal (kWh/m²/mes).

H(h)_m	H(h)_m: Radiación en un plano horizontal (kWh/m ² /mo)											
AÑO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2005	164.03	150.2	163.06	153.51	165.6	152.74	170.63	156.93	168.51	165.11	160.79	162.36
2006	171.14	155.21	154.57	157.3	172.52	152.08	161.06	170.5	167.47	157.26	156.23	164.71
2007	183.72	178.29	159.58	161.6	162.52	147.4	176.02	157.38	165.08	166.28	163.47	148.87
2008	167.15	163.11	166.53	158.23	162.93	152.58	163.48	166.63	161.09	159.36	142.88	165.51
2009	153.7	155.09	153.56	151.45	167.31	152.31	158.12	164.98	181.41	174.11	160.13	170.77
2010	187.3	146.23	159.04	163.3	171.08	158.26	165.28	162.2	163.71	166.94	152.4	149.27
2011	187.67	150.97	173.1	165.72	158.76	160.07	163.97	179.94	172.9	172.05	158.03	168.53
2012	168.27	170.02	169.75	162.28	172.93	164.09	162.24	160.4	89.41	169.33	155.75	167.52
2013	180.86	155.56	169.05	182.27	154.44	170.4	168.24	160.09	173.13	172.02	153.29	158.3
2014	176.23	158.4	163.76	167.75	171.72	152.86	165.43	164.28	174.39	166.39	164.91	177.71
2015	183.68	161.57	172.52	169.47	170.62	146.29	161	161.07	171.7	170.52	160.09	179.02
PROMEDIO	174.89	158.60	164.05	162.99	166.40	155.37	165.04	164.04	162.62	167.22	157.09	164.78

Tabla 14. Datos mensuales de radiación en un plano con pendiente óptima (kWh/m²/mes).

H(i_opt)_m	H(i_opt)_m: Radiación en una pendiente óptima (kWh/m ² /mo)											
AÑO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2005	167.74	152.31	163.41	152.38	162.79	149.52	166.83	155.27	168.2	166.62	163.96	166.69
2006	175.52	157.24	154.91	156.03	169.26	148.69	157.8	168.34	167.2	158.52	159.21	168.96
2007	188.75	181.25	160.04	160.32	159.94	144.25	172.03	155.71	164.83	167.85	166.84	152.4
2008	170.98	165.39	166.93	157.02	160.32	149.15	160.1	164.49	160.84	160.77	145.18	169.97
2009	156.9	157.26	153.94	150.37	164.21	148.89	154.73	162.86	181.12	175.93	163.22	175.86
2010	192.55	148.28	159.33	162.09	167.9	154.62	162.1	160.45	163.45	168.43	155.16	152.66
2011	192.83	152.94	173.54	164.31	156.2	156.26	160.56	177.32	172.65	173.7	161.19	173.58
2012	172.2	172.61	170.26	160.91	169.76	160.11	158.78	158.36	89.04	170.99	158.88	172.3
2013	185.98	157.72	169.39	180.48	151.9	166.06	164.62	158.16	172.89	173.95	156.35	162.86
2014	180.89	160.76	164.09	166.22	168.5	149.56	161.77	162.26	174.2	168.05	168.43	183.25
2015	188.91	163.83	173.14	167.98	167.25	143.14	157.63	158.96	171.48	172.33	163.64	184.85
PROMEDIO	179.39	160.87	164.45	161.65	163.46	151.84	161.54	162.02	162.35	168.83	160.19	169.40

En la tabla 13 se identifica el mes con menor radiación promedio multianual el cual corresponde al mes de junio, se toma el menor valor de radiación mensual para el dimensionamiento de los paneles para que de este modo se garantice el suministro energético en los demás meses del año. De igual manera en la tabla 14 se identifica la variación de la radiación en una superficie con inclinación óptima, si bien en algunos meses disminuye el valor de radiación en otros meses aumenta, por lo tanto, para economizar costos en estructura se considera orientar los paneles de forma completamente horizontal.

DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS

En la tabla 15 se presenta el dimensionamiento de un sistema de bombeo con energía solar equipado con baterías lo cual permite el funcionamiento del sistema en cualquier hora del día e incluso almacenar energía extra producida por los paneles.

Tabla 15. Cálculo y dimensionamiento de los equipos requeridos para alimentar el sistema de bombeo con energía solar fotovoltaica.

Cantidad de energía	$E_{req} = Potencia * Horas$		
Potencia de la bomba	2200	W	*Considerando la potencia de la bomba de 3 HP
N° horas de funcionamiento	12	h	*Adicionando una hora para la atención de posibles imprevistos
Cantidad de energía	26400	Watt-hora	
Energía producida por un panel FV	$E_{panel} = Potencia * HSP$		
Potencia del panel	550	Wp	
Cantidad de radiación	5.18	HSP	*Teniendo en cuenta que 1HSP = 1000 W/m ² y el valor de radiación de diseño es de 155.37 kWh/mes
Energía producida por un panel FV	2848.45	Wh/día	
N° de paneles FV	$N_{paneles} = \frac{E_{req}}{E_{panel}}$		
N° de paneles FV	9.27		
N° de paneles FV ajustados	10.00		
N° de baterías	$N_{baterias} = \frac{E_{req}}{E_{disponible}}$		
Energía que puede almacenar una batería	3600	Wh	*Considerando una batería de 12V 300AH
Energía disponible en la batería	1800	Wh	*Considerando no agotar mas del 50% la batería.
Energía requerida	26400	Wh	
N° de baterías	14.67		
N° de baterías ajustado	15.00		

De acuerdo a la tabla 15 son requeridos 10 paneles solares fotovoltaicos junto con 15 baterías para el correcto funcionamiento del sistema, este banco de baterías podría aumentar en caso de requerir almacenar mayor energía en los meses de mayor radiación. En el presente sistema de riego diseñado no es viable la operación del sistema sin baterías puesto que el tiempo de riego es de 12 horas de las cuales al menos 4 horas contará con una cantidad de radiación muy baja.

ESPECIFICACIONES TECNICAS DE LOS EQUIPOS SELECCIONADOS

Tabla 16. Especificaciones técnicas de los equipos requeridos en el sistema de bombeo.

Unidad de Bombeo		
Altura (ADT) Maxima	57	m
Caudal máximo	58	GPM
Caudal medio	40	GPM
Altura media	40	m
Potencia	3	HP
Tipo de bomba	Electrobomba	
Panel fotovoltaico		
Potencia máxima	550	Wp
tipo de celda	Monocristalino	
Baterías		
Voltaje nominal	12	V
Capacidad nominal	300	AH
Tipo de batería	gel	
Inversor		
Potencia	2.2	kW
Voltaje de entrada	150-400	V-DC
Voltaje de salida	220	V-AC

ESQUEMA DEL SISTEMA DE RIEGO

A continuación, se presenta el esquema del sistema y de una unidad de riego tipo junto con todos sus componentes.

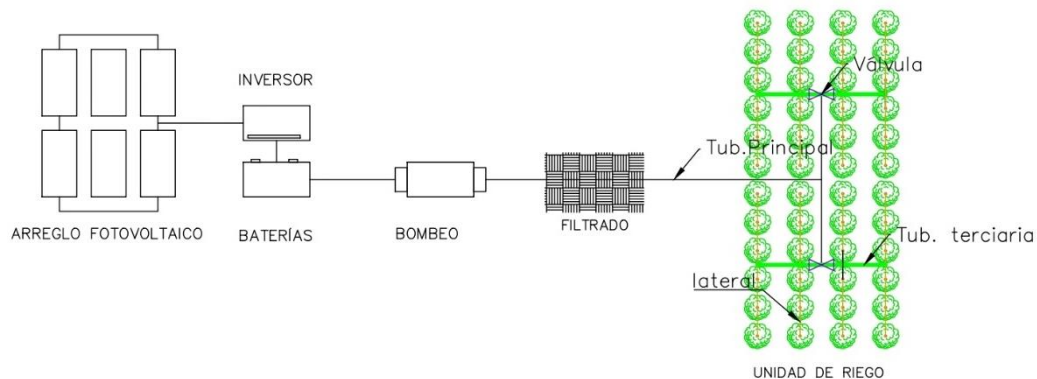


Figura 7. Esquema del sistema de riego y una unidad de riego tipo con todos sus componentes.

Presupuesto para la implementación del sistema de riego

A continuación, se presenta el presupuesto para el sistema de riego localizado en la modalidad de microaspersión para el cultivo de limón Tahití.

Tabla 17. Presupuesto del sistema de riego localizado por microaspersión.

PRESUPUESTO SISTEMA DE RIEGO CON ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA					
ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
1	Unidad de riego				
	Microaspersor auto compensado; diámetro boquilla 1,48mm; Presión de trabajo 22mca; Caudal 55 l/h; dh 4.5m.	Un	406	\$ 4,800.00	\$ 1,948,800.00
	Estaca (25cm)	Un	406	\$ 1,200.00	\$ 487,200.00
				Subtotal	\$ 2,436,000.00
2	Conducción y distribución				
	Manguera PE 12 mm	ML	1406	\$ 415.00	\$ 583,490.00
	Tubería PVC 1/2" RDE 26	ML	258	\$ 2,577.33	\$ 664,952.00
	Tubería PVC 1" RDE 26	ML	192	\$ 5,229.83	\$ 1,004,128.00
	Tubería PVC 1 - 1/2" RDE 26	ML	242	\$ 9,983.67	\$ 2,416,047.33
				Subtotal	\$ 4,668,617.33
3	Accesorios				
	Codo 45° PVC 1 - 1/2"	Un	1	\$ 1,295.00	\$ 1,295.00
	Tee estandar - flujo recto PVC 1 - 1/2"	Un	12	\$ 11,570.00	\$ 138,840.00
	Válvula de globo abierta 1/2"	Un	12	\$ 12,802.00	\$ 153,624.00
	Codo 90° PVC 1 - 1/2"	Un	2	\$ 8,799.00	\$ 17,598.00
	Tee estandar - flujo recto 1/2"	Un	86	\$ 1,033.00	\$ 88,838.00
				Subtotal	\$ 400,195.00
4	Unidad de filtrado				
	Filtro de malla plástica 1 - 1/2"	Un	1	\$ 33,400.00	\$ 33,400.00
				Subtotal	\$ 33,400.00
5	Unidad de bombeo				
	Electrobomba 15H-3MW	Un	1	\$ 2,313,000.00	\$ 2,313,000.00
				Subtotal	\$ 2,313,000.00
6	Mano de obra				
	Excavación para tubería principal, secundaria y múltiples (0.3 m x 0.3 m)	m3	62.28	\$ 12,900.00	\$ 803,412.00
	Tapado de excavaciones	m3	62.28	\$ 6,500.00	\$ 404,820.00
	Instalación de tubería principal, secundaria y múltiples	ML	692	\$ 800.00	\$ 553,600.00
	Armado e instalación de microaspersores	Un	406	\$ 500.00	\$ 203,000.00
				Subtotal	\$ 1,964,832.00
TOTAL DISEÑO DE RIEGO POR MICROASPERSIÓN					\$ 11,816,044.33
TOTAL DISEÑO DE RIEGO POR MICROASPERSIÓN / HECTAREA					\$ 11,816,044.33

Tabla 18. Presupuesto del sistema de riego localizado por microaspersión con sistema de alimentación fotovoltaico con baterías.

PRESUPUESTO SISTEMA DE RIEGO CON ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA					
ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
1	Sistema con baterías				
	Panel monocristalino 550W 24V	Un	10	\$ 1,152,000.00	\$ 11,520,000.00
	Batería 12V 300AH	Un	15	\$ 1,896,398.00	\$ 28,445,970.00
	Inversor 2.2 kW 220V	Un	1	\$ 4,077,800.00	\$ 4,077,800.00
				Subtotal	\$ 44,043,770.00
TOTAL DISEÑO DE RIEGO POR MICROASPERSIÓN					\$ 11,816,044.33
TOTAL DISEÑO DE RIEGO POR ASPERSIÓN Y SISTEMA FOTOVOLTAICO CON BATERIAS					\$ 55,859,814.33

RELACIÓN COSTO BENEFICIO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE RIEGO CON ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

De acuerdo a los resultados obtenidos en el presupuesto del sistema de riego empleando energía solar fotovoltaica se analiza el costo energético si se empleara energía hidroeléctrica, a continuación, se presentan los resultados.

Tabla 19. Costo anual del bombeo con energía convencional (hidroeléctrica) y periodo de recuperación de inversión para las opciones de implementación de energía fotovoltaica.

COSTO ANUAL DEL SISTEMA DE BOMBEO CON ENERGIA CONVENCIONAL (HIDROELECTRICA)			
Costo promedio del kWh	\$ 575.95	\$	*Valor promedio del kWh en el país
Cantidad de energía requerida anual	9636	kWh	* Tomando la cantidad de energía requerida diariamente de 26400 Wh
Costo anual del sistema de bombeo	\$ 5,549,854.20	\$	*considerando el uso diario del sistema de riego
PERIODO DE RECUPERACIÓN DE LA INVERSION SISTEMA FOTOVOLTACIO CON BATERIAS			
Costo sistema fotovoltaico con baterías	\$ 44,043,770.00	\$	
Periodo de recuperación de la inversión	8.00	Años	

En la tabla 19 se puede observar el elevado costo de funcionamiento de un sistema de riego con energía hidroeléctrica anualmente mientras que estos costos de funcionamiento en un sistema fotovoltaico son cero, también se puede observar que, aunque la inversión inicial en un sistema fotovoltaico puede considerarse alta, el sistema se amortiza en el tiempo además de que la mayoría de elementos cuentan con vida útil igual o superior a 10 años.

CONCLUSIONES

El balance hídrico de la zona de estudio permitió identificar que es una zona continuamente bajo déficit hídrico exceptuando algunos meses que se consideran lluviosos como los meses de abril, noviembre y diciembre, lo cual supone una necesidad constante de aplicación de agua en forma de riego a los cultivos para su óptimo desarrollo, en el caso específico de los cítricos presentan el mayor déficit hídrico durante el 75% del año lo que hace imposible establecer este tipo de cultivos sin un sistema de riego.

La zona de estudio cuenta con uno de los valores de radiación más altos del país con un promedio diario multianual de 5.45 kWh/m² lo cual lo hace un candidato apropiado para incursionar en la implementación de energías alternativas en todas sus aplicaciones especialmente en el sector agrícola

Si bien un sistema de riego alimentado con energía solar fotovoltaica puede representar inicialmente un alto costo de implementación, sin embargo, a largo plazo es un sistema de costo cero para el productor lo cual le permite disminuir en general sus costos de producción y aumentar las utilidades contribuyendo al desarrollo de una región.

El presente trabajo al analizar un sistema de riego localizado por microaspersión permitió evidenciar que es posible y económicamente viable su implementación en una zona de alta radiación solar como lo es el municipio de Natagaima – Tolima un municipio en el cual las precipitaciones son escasas y difícilmente se establecen cultivos de alto valor comercial como los frutales.

Es necesario continuar con posteriores investigaciones en sistemas de riego con energías alternativas por ejemplo sistemas localizados con presiones de operación menores como el sistema de riego por goteo o cintas de goteo, también es posible analizar las diferentes opciones comerciales como los kits de bombeo solar y la implementación de estos sistemas bajo diferentes condiciones climáticas de la geografía colombiana.

REFERENCIAS

Allen Richard G, Pereira Luis S, Raes Dirk, Smith Martin, (1998) Evapotranspiración del Cultivo, Guías para la determinación del requerimiento de agua de los cultivos. ISBN 92-5-304219-2.

Bancolombia (2018). Guía Completa: el Arte de Cultivar Limón Tahití, recuperado de: <https://www.bancolombia.com/wps/portal/negocios/actualizate/sostenibilidad/guia-cultivo-limon-tahiti> fecha: 08 de febrero de 2022.

Elizondo René M, (1991). Riego Localizado, Diseño y Evaluación, Universidad Autónoma de Chapingo, ISBN 9688841153, 9789688841150

García-Muñoz, MC, Henao-Rojas, JC, Moreno-Rodríguez, JM, Botina-Azain, BL, & Romero-Barrera, Y. (2021). Efecto del portainjerto y factores ambientales en la calidad de la fruta de limón persa (*Citrus latifolia* Tanaka) cultivado en regiones tropicales. Diario de composición y análisis de alimentos, 103, 104081. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104081>

Goldberg, D. (1974). Conceptos modernos de riego, centro regional de ayuda técnica, México pág. 11-13.

Hargreaves, G. (1983). Discussion of ‘Application of Penman equation wind function’ by Cuenca, R.H. y Nicholson, M.J. J. Irrig. and Drain. Engrg., Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 109, Issue 2 (June 1983) DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1983\)109:2\(277\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1983)109:2(277))

IDEAM (2017) Validación de las Fórmulas de Evapotranspiración de Referencia ETo para Colombia, Nota técnica del IDEAM, IDEAM-METEO/002-2018

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura – IICA. (2014). Plan Agroproductivo del Distrito de Riego del Triángulo del Tolima: una experiencia desde lo local. ISBN: 978-92-9248-550-4.

Keller, J. & Karmeli, D. (1975) Trickle Irrigation Design Parameters. Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corporation, Glendora, 133p.

Martínez, G. A. L., Moreno, F. G., & Fierro, J. B. (2013). Modelo a escala de un sistema de riego automatizado, alimentado con energía solar fotovoltaica: nueva perspectiva para el desarrollo agroindustrial colombiano. Tecnura, 17, 33-47. DOI: <https://doi.org/10.14483/22487638.7221>

Merriam, J. L., & Keller, J. (1978). Farm irrigation system evaluation: A guide for management. Farm irrigation system evaluation: a guide for management.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2020). Resolución N° 000311 de 2020 “Por la cual se adopta el Plan Nacional de Riego 2020-2039”.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2020) Cadena de cítricos indicadores e instrumentos, primer semestre 2020.

Pedraza, C. G. (2020). Proyecto de riego utilizando energía solar para el cultivo de limones en la finca contador del municipio de Viani. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10654/36184>.

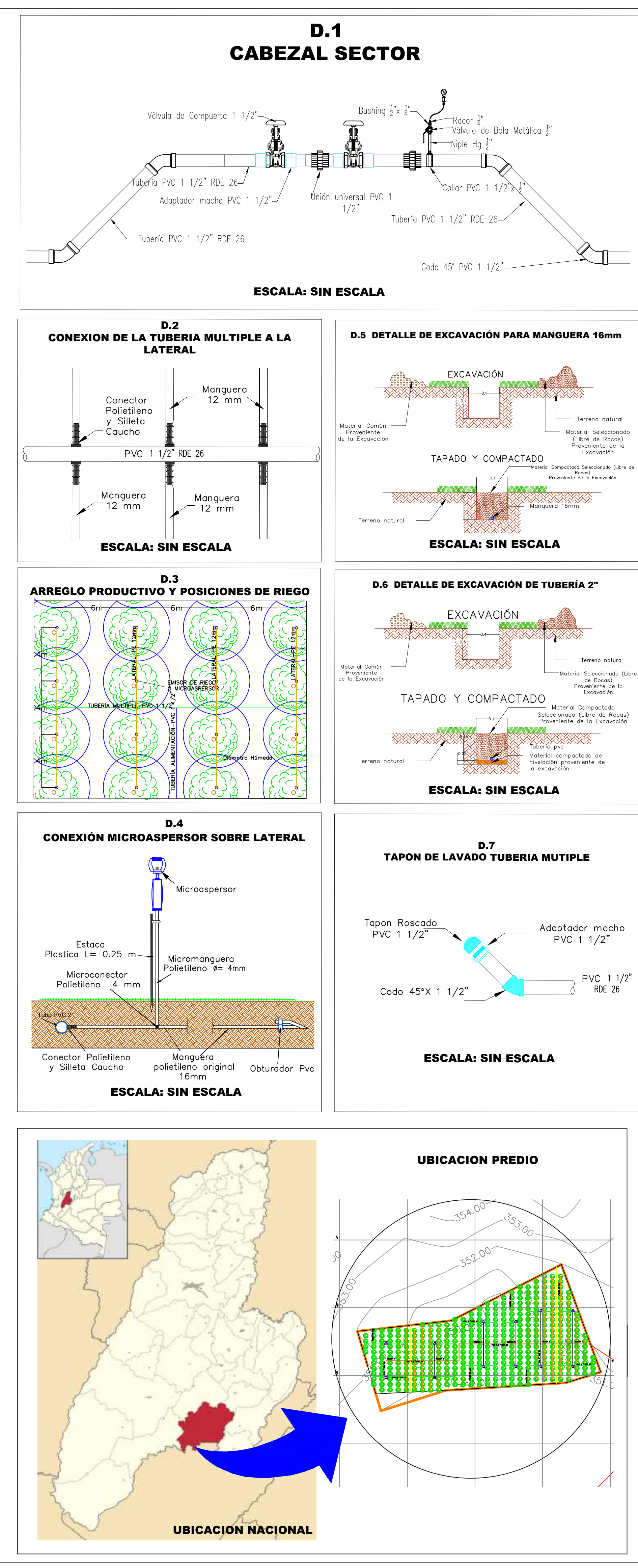
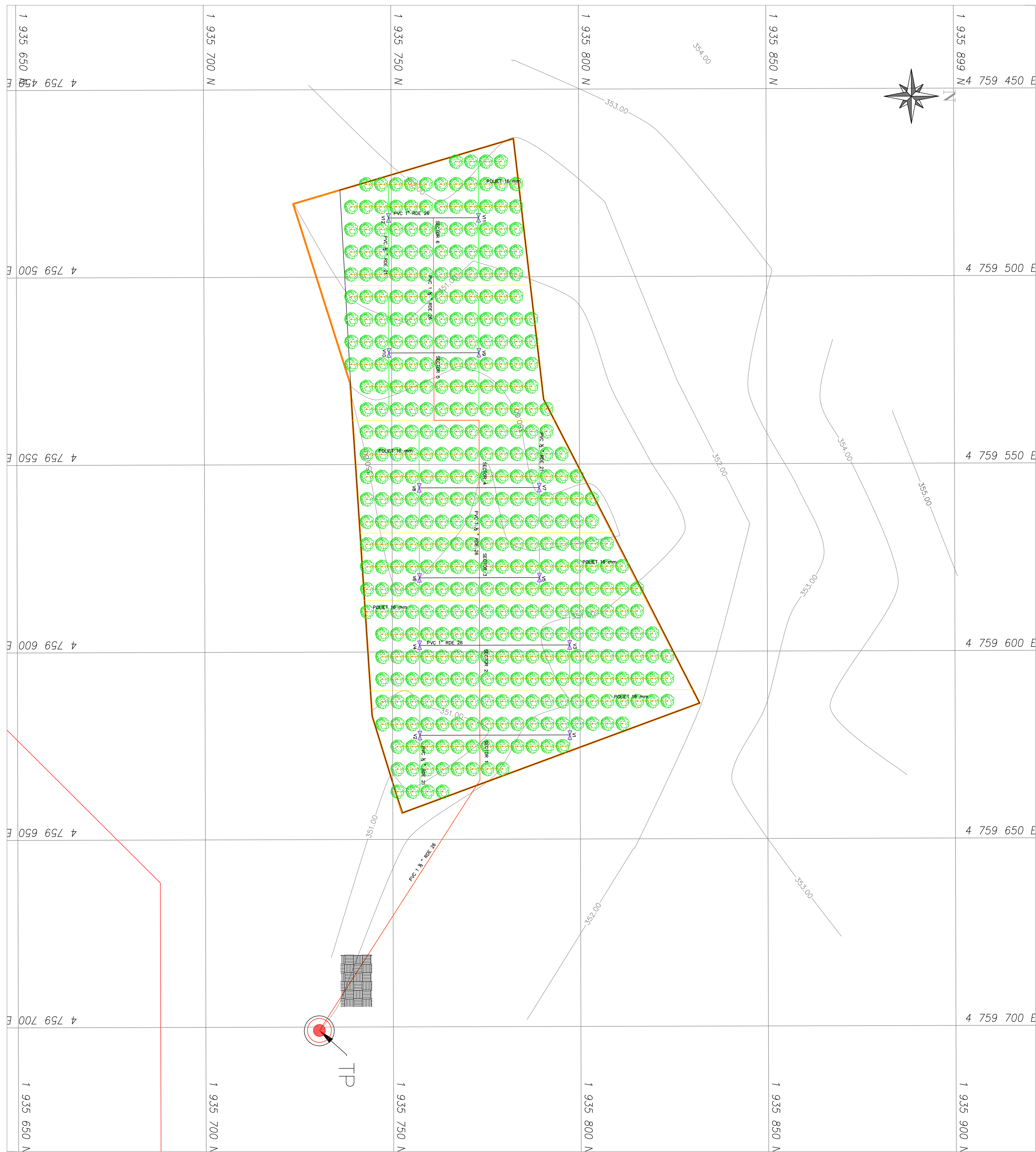
Raddatz-Mota, D., Franco-Mora, O., Mendoza-Espinoza, JA, Rodríguez-Verástegui, LL, de León-Sánchez, FD, & Rivera-Cabrera, F. (2019). Efecto de diferentes portainjertos sobre la calidad poscosecha de limón persa (*Citrus latifolia* T.). *Scientia Horticulturae* , 257 , 108716. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108716>

Raddatz-Mota, D., Barbosa-Martínez, C., Jacuinde-Guzmán, JK, Alia-Tejacal, I., Soriano-Melgar, LDAA, & Rivera-Cabrera, F. (2021). Desarrollo de oleocelosis en frutos de limón persa (*Citrus latifolia* T.) influenciado por portainjertos de cítricos. *Scientia Horticulturae* , 271 , 109461. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109461>

World Meteorological Organization – WMO (1970) Technical note N° 111, The Planning of Meteorological Station Networks.

ANEXOS

1. Plano planta general sistema de riego.
2. Análisis de suelos
3. Datos simulación presión en las válvulas



NOTAS

ORIGEN DE COORDENADAS
 MAGNA SIRGAS CTM12 ORIGEN NACIONAL
 Projection: Transverse_Mercator
 False_Easting: 5000000.0
 False_Northing: 2000000.0
 Central_Meridian: -73.0
 Scale_Factor: 0.9992
 Latitude_Of_Origin: 4.0
 Linear Unit: Meter (1,0)

PLANOS DE REFERENCIA

Planta_Gral.dwg

CONVENCIONES

- TUBERÍA 1 1/2" RDE 26
- TUBERÍA 1" RDE 26
- TUBERÍA 1/2" RDE 21
- MANGUERA Ø 12mm
- CONTORNO DE ÁREA A IRRIGAR
- ÁREA DEL PREDIO
- CABEZAL SECTOR
- TOMA PREDIALES
- FILTRO DE DISCOS
- SECTOR DE RIEGO

NOTAS

CARACTERÍSTICAS DEL PREDIO

MUNICIPIO	NATAGAIMA
VEREDA	BALSILLAS
TEXTURA	Franco- Arcilloso
CULTIVO	LIMÓN TAHITI
MÉTODO DE RIEGO	MICROASPIERCIÓN
TIPO DE EMISOR	AUTOCOMPENSADO
PARÁMETROS DE RIEGO	CANTIDAD/UNIDAD
ÁREA BRUTA	1.0 [ha]
ÁREA NETA DE RIEGO	1.0 [ha]
CAUDAL PARA RIEGO	1.3 [l/s]
CAUDAL EN LA TOMA	1.3 [l/s]
DIÁMETRO TOMA PREDIAL	1.0 [pulg.]
PRESIÓN REQUERIDA EN LA TOMA	46.0 [m.c.a]
PRESIÓN DISPONIBLE DEL DISTRITO	-- [m.c.a]
JORNADA DE OPERACIÓN (Jo) :	8.0 [h]
CAUDAL DEL MICROASPIERSOR	55.0 [l/h]
PRESIÓN DE TRABAJO	27.7 [m.c.a]
DIÁMETRO HÚMEDO DEL EMISOR	4.5 [m]
DIÁMETRO DE LA LÍNEA LATERAL PE	12.0 [mm]
ESPACIAMIENTO ENTRE LATERALES	6.0 [m]
ESPACIAMIENTO ENTRE EMISORES	4.0 [m]
FRECUENCIA DE RIEGO	1.8 [días]
TIEMPO DE RIEGO TOTAL /DÍA	30.5 [h]
TIEMPO DE RIEGO POR SECTOR	3 horas
NÚMERO DE SECTORES REGADOS AL	2.0 -
NÚMERO DE SECTORES DE RIEGO	6.0 -
No. DE VÁLVULAS/SECTOR	2.0
No. DE VÁLVULAS OPERANDO	2.0
CAUDAL POR SECTOR	1.3 l/s
No. EMISORES MÁX. POR LATERAL	7.0 -
No. MÁX. DE EMISORES /VÁLVULA	76.0 -
FILTRADO	Discos
Ø SUBCABEZAL	1 1/2 pulg.
Ø TUBERÍA PRINCIPAL	1 1/2 pulg.
Ø TUBERÍA MÚLTIPLE	1/2 pulg.

UBICACION PREDIO

UBICACION NACIONAL

ESCALA

0 22.5 45 Metros

ENTREGA DE RESULTADOS



INFORME DE RESULTADOS ANÁLISIS DE SUELOS

Código: ENR -FR-03

Vigente: 2020-01-30

Versión: 00

Página : 1 de 1

DATOS DEL CLIENTE

SOLICITANTE: Leidy Ortiz

TELÉFONO: 3188948254

CIUDAD: Neiva

DIRECCIÓN: Calle 26B N° 52A - 44

EMAIL: lad.ortiz19@gmail.com

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

MUNICIPIO: Natagaima

DEPARTAMENTO: Tolima

CULTIVO: No Reporta

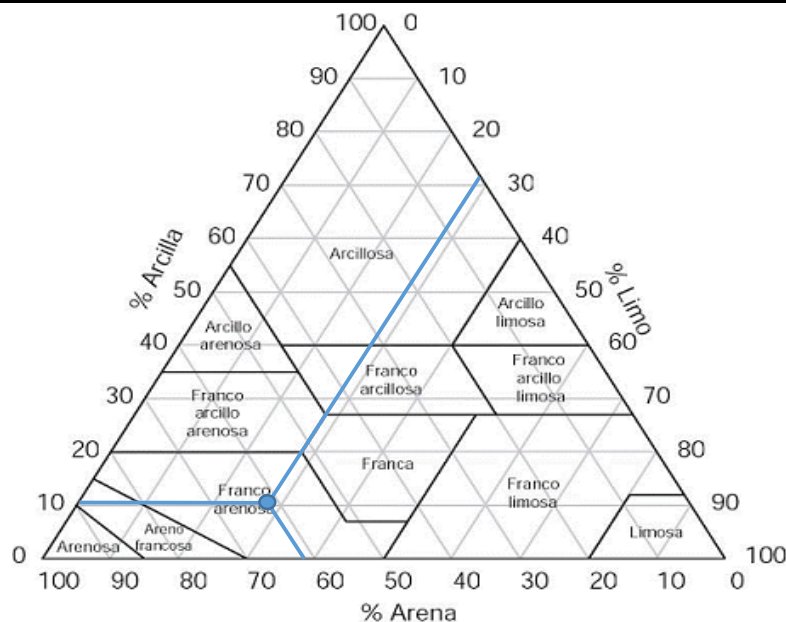
ID CLIENTE: muestra 2 (40 -80)

FECHA DE RECEPCIÓN: 16/03/2023

FECHA DE ENTREGA: 16/04/2023

RESULTADOS

Muestra lab No.	PARÁMETRO	MÉTODO/ TÉCNICA ANALÍTICA	UNIDADES	RESULTADO	
357-22	Densidad Aparente	Terrón Parafinado o método interno	g.cm-3	1,51	
	Densidad Real	Picnómetro o método interno	g.cm-3	2,44	
	Porosidad Total	Relación de densidades	%	38,11	
	Retención de Humedad	Capacidad de campo	Ollas y platos de presión o método inteno	%	21,68
		Punto de Marchitez Permanente			10,41
	Textura	Arena	Bouyoucos	%	61,57
		Arcilla			10,05
		Limo			28,38
		Clasificación			Franco Arenoso



Armando Torrente

Director Laboratorio

Armando Torrente Trujillo M.Sc. Ph.D

Carrera 5ª No. 21ª -61 B/ Sevilla – Telefax 8666848 Cel 3142480137

E-mail. Lagsalaboratorio@gmail.com - Comercial@laboratoriolagsa.com

Neiva-Huila

ENTREGA DE RESULTADOS



INFORME DE RESULTADOS ANÁLISIS DE SUELOS

Código: ENR -FR-03

Vigente: 2020-01-30

Versión: 00

Página : 1 de 1

DATOS DEL CLIENTE

SOLICITANTE: Leidy Ortiz

TELÉFONO: 3188948254

CIUDAD: Neiva

DIRECCIÓN: Calle 26B N° 52A - 44

EMAIL: lad.ortiz19@gmail.com

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

MUNICIPIO: Natagaima

DEPARTAMENTO: Tolima

CULTIVO: No Reporta

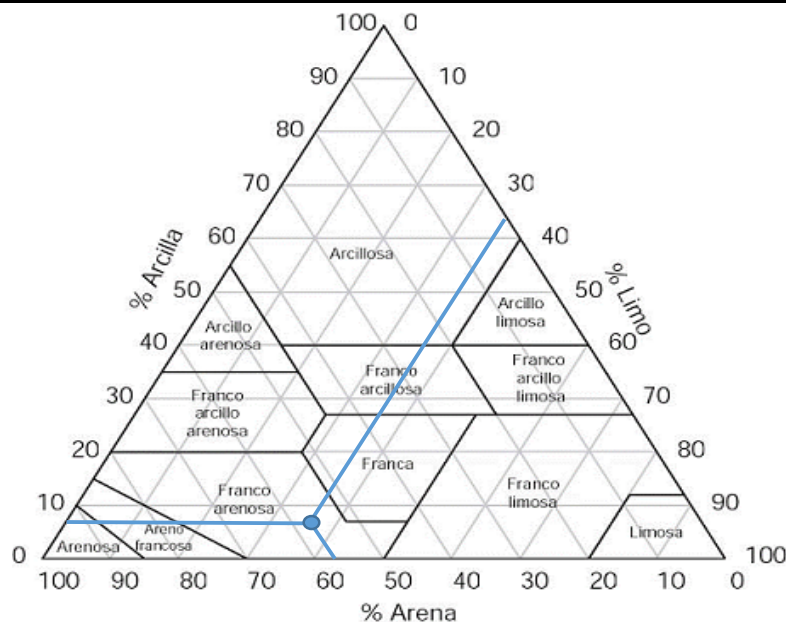
ID CLIENTE: muestra 1 (0-40)

FECHA DE RECEPCIÓN: 16/03/2023

FECHA DE ENTREGA: 16/04/2023

RESULTADOS

Muestra lab No.	PARÁMETRO	MÉTODO/ TÉCNICA ANALÍTICA	UNIDADES	RESULTADO	
358-22	Densidad Aparente	Terrón Parafinado o método interno	g.cm-3	1,43	
	Densidad Real	Picnómetro o método interno	g.cm-3	2,39	
	Porosidad Total	Relación de densidades	%	40,17	
	Retención de Humedad	Capacidad de campo	Ollas y platos de presión o método inteno	%	23,80
		Punto de Marchitez Permanente			13,98
	Textura	Arena	Bouyoucos	%	57,00
		Arcilla			7,00
		Limo			36,00
		Clasificación			Franco Arenoso



Armando Torrente Trujillo

Director Laboratorio

Armando Torrente Trujillo M.Sc. Ph.D

Carrera 5ª No. 21ª -61 B/ Sevilla – Telefax 8666848 Cel 3142480137

E-mail. Lagsalaboratorio@gmail.com - Comercial@laboratoriolagsa.com

Neiva-Huila

VALVULAS ID	PRESIÓN (mca)					
	TURNO 1	TURNO 2	TURNO 3	TURNO 4	TURNO 5	TURNO 6
V1	36.87	34.78	38.19	35.42	34.95	37.04
V2	37.15	34.97	38.38	35.61	35.13	37.22
V3	37.49	33.18	38.03	34.98	34.45	36.75
V4	37.85	34.34	38.38	35.33	34.81	37.11
V5	38.14	34.92	38.07	35.08	34.51	37.00
V6	38.44	35.22	38.47	35.38	34.81	37.30
V7	38.50	35.27	38.73	34.42	34.19	36.89
V8	39.36	36.14	39.60	35.16	35.05	37.75
V9	38.30	35.08	38.54	34.61	31.92	35.56
V10	37.92	34.7	38.15	34.23	31.67	35.18
V11	37.06	33.84	37.29	33.37	31.09	33.42
V12	36.99	33.77	37.23	33.30	31.03	33.43