



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 1

Neiva, 17 de mayo de 2024

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

El (Los) suscrito(s):

Andrea Julieth Pascuas Quintero, con C.C. No. 1075316614,

Cristian Camilo Mosquera Mosquera, con C.C. No. 1075313142

Autor(es) de la tesis titulada DISEÑO AGRONÓMICO E HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE RIEGO POR ASPERSIÓN, EMPLEADO EFLUENTE DE LA EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA

Presentado y aprobado en el año 2024 como requisito para optar al título de Ingeniero Agrícola;

Autorizo (amos) 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.

Autor/Estudiante: Andrea Julieth Pascuas Quintero

Autor/Estudiante: Cristian Camilo Mosquera Mosquera

Firma: _____

Firma: _____

Vigilada Mineducación



CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 3
---------------	---------------------	----------------	----------	-----------------	-------------	---------------	---------------

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: Diseño agronómico e hidráulico de un sistema de riego por aspersión, empleando efluente de la extracción de aceite de palma

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Pascuas Quintero	Andrea Julieth
Mosquera Mosquera	Cristian Camilo

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Bedoya Cardoso	Marlio

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
N/A	N/A

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero agrícola

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Ingeniería agrícola

CIUDAD: Neiva **AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2024 **NÚMERO DE PÁGINAS:** 39

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas Fotografías Grabaciones en discos Ilustraciones en general Grabados
Láminas Litografías Mapas Música impresa Planos Retratos Sin ilustraciones
Tablas o Cuadros

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: Epanet 2.0

MATERIAL ANEXO: Simulación hidráulica (.NET) y plano (.PDF)

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.



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

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

Español

1. Colmatar
2. Déficit hídrico
3. Lagunas de estabilización
4. Riego presurizado

Inglés

1. Clogging
2. Water deficit
3. Stabilization ponds
4. Pressurized irrigation

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Colombia es el país de mayor producción de aceite de palma en Latinoamérica y es el cuarto productor a nivel mundial. Debido al crecimiento poblacional, aumenta la demanda de productos derivados de aceite de palma y con esto, surge la necesidad de emplear sistemas de riego más eficientes que satisfagan el déficit hídrico en época de verano y permitan alcanzar mayores producciones. El aumento de la producción es directamente proporcional con la generación de residuos y lixiviados durante el proceso de extracción, posteriormente son depositados en lagunas de estabilización de materia orgánica y remoción de patógenos a través de un proceso de descomposición biológica natural, cuya consecuencia es la decantación de partículas sólidas que se colmatan, se acumulan y disminuyen el volumen disponible de almacenamiento, por ende, se debe garantizar la evacuación periódica de estos subproductos y evitar el deterioro de los recursos naturales por parte de Unipalma S.A.

Por lo mencionado anteriormente se propuso un sistema de riego por aspersión como prueba piloto para brindar una solución que mitigue la acumulación excesiva en las lagunas y suministre el requerimiento hídrico del cultivo de palma. A partir de la información histórica del clima, se determina que presenta periodos muy pronunciados de sequía y esto, afecta de forma directa a la producción de frutos, siendo este, uno de los motivos principales para emplear un sistema de riego que alcance una alta eficiencia y su producción sea sostenible a largo plazo.



ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

Colombia is the largest palm oil producing country in Latin America and the fourth largest producer worldwide. Due to population growth, the demand for products derived from palm oil increases and with this comes the need to use more efficient irrigation systems that satisfy the water deficit during the summer season and achieve higher productions. The increase in production is directly proportional to the generation of residues and leachates during the extraction process, which are subsequently deposited in ponds for stabilizing organic matter and removing pathogens through a natural biological decomposition process, resulting in the settling of solid particles that become clogged, accumulate excessively and reduce the available storage volume, therefore, the periodic evacuation of these by products must be guaranteed and the deterioration of natural resources by Unipalma S.A. must be avoided.

In view of the above, it was decided to propose a sprinkler irrigation system as a pilot test to provide a solution to mitigate the excessive accumulation in the ponds and supply the water requirements of the palm crop. Based on historical climate information, it was determined that there are very pronounced periods of drought, which directly affects fruit production, and this is one of the main reasons for using an irrigation system that achieves high efficiency and sustainable production in the long term.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Jurado: EDINSON MUJICA RODRIGUEZ

Firma:

Nombre Jurado: JAVIER EDUARDO BONILLA

Firma:

Diseño agronómico e hidráulico de un sistema de riego por aspersión, empleando efluente de la extracción de aceite de palma



Trabajo de grado presentado al programa de Ingeniería Agrícola como requisito para optar al título de: Ingeniero Agrícola

Autores:

Andrea Julieth Pascuas Quintero: 20161145922

Cristian Camilo Mosquera Mosquera: 20161145477

Universidad Surcolombiana
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Agrícola
Neiva, Huila.
2023

Director: Marlio Bedoya Cardoso

Nota de aceptación

Jurado: Javier Eduardo Bonilla

Jurado: Edinson Mujica Rodríguez

Dedicatoria

Me gustaría dedicar el presente trabajo a mis padres, por su incondicional amor y apoyo para alcanzar mis metas y las enseñanzas que forjaron en mí criterio encaminado a la ética profesional. A mis abuelos de quién adquirí mi vocación por la agricultura. A mis hermanos, que me llenan de orgullo y me motivan a hacer las cosas bien para servir de guía en su vida.

Cristian Camilo Mosquera Mosquera.

Dedico este proyecto de grado a mi familia, quienes me han apoyado durante mi etapa académica e inspirado a ser una gran profesional; mi papá de quién admiro su ingenio, a mi mamá por su constancia y amor, y a mis hermanas por ser mi gran motivación.

Andrea Julieth Pascuas Quintero.

DISEÑO AGRONÓMICO E HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE RIEGO POR ASPERSIÓN, EMPLEANDO EFLUENTE DE LA EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA

RESUMEN

Colombia es el país de mayor producción de aceite de palma en Latinoamérica y es el cuarto productor a nivel mundial. Debido al crecimiento poblacional, aumenta la demanda de productos derivados de aceite de palma y con esto, surge la necesidad de emplear sistemas de riego más eficientes que satisfagan el déficit hídrico en época de verano y permitan alcanzar mayores producciones. El aumento de la producción es directamente proporcional con la generación de residuos y lixiviados durante el proceso de extracción, posteriormente son depositados en lagunas de estabilización de materia orgánica y remoción de patógenos a través de un proceso de descomposición biológica natural, cuya consecuencia es la decantación de partículas sólidas que se colmatan, se acumulan y disminuyen el volumen disponible de almacenamiento, por ende, se debe garantizar la evacuación periódica de estos subproductos y evitar el deterioro de los recursos naturales por parte de Unipalma S.A.

Por lo mencionado anteriormente se propuso un sistema de riego por aspersión como prueba piloto para brindar una solución que mitigue la acumulación excesiva en las lagunas y suministre el requerimiento hídrico del cultivo de palma. A partir de la información histórica del clima, se determina que presenta periodos muy pronunciados de sequía y esto, afecta de forma directa a la producción de frutos, siendo este, uno de los motivos principales para emplear un sistema de riego que alcance una alta eficiencia y su producción sea sostenible a largo plazo.

Palabras clave: colmatar, déficit hídrico, lagunas de estabilización, riego presurizado.

ABSTRACT

Colombia is the largest palm oil producing country in Latin America and the fourth largest producer worldwide. Due to population growth, the demand for products derived from palm oil increases and with this comes the need to use more efficient irrigation systems that satisfy the water deficit during the summer season and achieve higher productions. The increase in production is directly proportional to the generation of residues and leachates during the extraction process, which are subsequently deposited in ponds for stabilizing organic matter and removing pathogens through a natural biological decomposition process, resulting in the settling of solid particles that become clogged, accumulate excessively and reduce the available storage volume, therefore, the periodic evacuation of these by products must be guaranteed and the deterioration of natural resources by Unipalma S.A. must be avoided.

In view of the above, it was decided to propose a sprinkler irrigation system as a pilot test to provide a solution to mitigate the excessive accumulation in the ponds and supply the water requirements

of the palm crop. Based on historical climate information, it was determined that there are very pronounced periods of drought, which directly affects fruit production, and this is one of the main reasons for using an irrigation system that achieves high efficiency and sustainable production in the long term.

Keywords: clogging, water deficit, stabilization ponds, pressurized irrigation.

INTRODUCCIÓN

La palma de aceite es una planta tropical propia de climas cálidos que crece en altitudes de 0 a 500 msnm. Su nombre científico es *Elaeis guineensis* Jac. Su origen se ubica en el golfo de Guinea en el África occidental por eso su denominación popular es palma africana de aceite. (Sula, 2009). “Este aceite es una biomasa representativa e importante, no solo como el aceite vegetal comestible más consumido en todo el mundo, sino también como material para productos químicos y biocombustibles” (Sakai *et al.*, 2022).

La palma de aceite es la oleaginosa más productiva del planeta; una hectárea sembrada produce entre 6 y 10 veces más aceite que las demás. El cultivo de palma de aceite está presente en 161 municipios y 21 departamentos de Colombia, divididas en cuatro zonas: norte, central, oriental y suroccidental, con un área de 595.722 hectáreas. Colombia es el cuarto productor a nivel mundial y primero en América, con un 14% de participación PIB agrícola en el país. En el acumulado del año 2022 hasta el mes de junio la producción alcanzó 979.685 toneladas, teniendo un aumento del 2,6% comparado al mismo periodo del año 2021 (955.308 toneladas). (FEDEPALMA,2022).

Con el crecimiento poblacional, la demanda de los productos derivados de la palma de aceite exige alcanzar niveles superiores en producción para subsanar la necesidad, lo que conduce a el aumento de la generación de residuos provenientes de los procesos industriales en la extracción del aceite. A partir de esto, se obliga a dar un uso apropiado para la reintegración del contenido orgánico presente en estos subproductos, implementando buenas prácticas para no afectar las cuencas hídricas aledañas, siguiendo así, los lineamientos normativos en la resolución 631 del 2015 para el caso de Colombia, donde se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales (MADS, 2015).

A nivel internacional Malasia e Indonesia son los países con mayor exportación, consumo y producción con el 85% de aceite de palma, por lo cual su relevancia en el impacto de la industria, impuestos, política y mercado a nivel mundial (Hasan, 2016). Al ser los mayores productores de aceite de palma, la generación de subproductos es de gran magnitud, por lo que se enfrenta a una problemática ambiental que exige la búsqueda del manejo de estos residuos mediante tratamientos con altos estándares. Los sistemas que utilizan la digestión anaerobia funcionan de manera acertada mediante el uso de lagunas de estabilización y tanques anaeróbicos, sin embargo, con la alta demanda en la producción de efluentes, se ha implementado tecnología que permite cumplir con la normativa ambiental. Por ejemplo, procesos físicos como la sedimentación, filtración, secado, floculación y centrifugación que trabajan de manera independiente o mediante sistemas mixtos, son costosos y poco efectivos a lo largo del tiempo, debido a la dispersión y emulsificación de los sólidos suspendidos de los efluentes. Por ello se recomienda un sistema de tratamiento que se base en la digestión anaerobia bajo el mismo principio con la diferencia en el desarrollo utilizado por la mayoría de las plantas en Malasia (Petitpierre, 1981).

Otra alternativa utilizada en Malasia en el año 2011 para el tratamiento de aguas residuales es el Vermicompostaje, ya que a pesar de que los residuos son orgánicos, son de difícil descomposición natural, sin embargo, las lombrices pueden digerirlo y generar un producto final

libre de patógenos y con altos contenidos nutricionales que se pueden utilizar en fertilizantes (Singh *et al.*,2011).

Igualmente se ha buscado la reducción en el consumo de energía y aumento de eficiencia en la remoción de contaminantes, también ha sido propuesto el tratamiento por medio del secado convectivo de lodos, el cual demostró tener una eficiencia excepcional, donde se opera con vapor y no electricidad, reduciendo el consumo de energía, produciendo subproductos sólidos de alto contenido de micronutrientes secundarios como el Calcio y Magnesio que pueden reutilizarse como fertilizantes y los residuos líquidos provenientes de la cocción, se pueden aprovechar para regar la plantación (Farid *et al.*,2019).

En el contexto nacional, diferentes organizaciones han trabajado en la búsqueda de soluciones que permitan el reuso de este recurso, como es el caso de Aceites Manuelita S.A Y Fedepalma que en el 2016 presentan ante Cormacarena una investigación a nivel piloto para mejorar las prácticas ambientales y agronómicas aprovechando el contenido nutricional resultado de los efluentes de la planta extractora de aceite. La propuesta fue denominada: “Determinación del efecto ambiental y agronómico en el suelo y las aguas subterráneas por el aprovechamiento de efluentes tratados en sistemas de fertirrigación en cultivos de palma de aceite” y tiene como objetivo establecer las condiciones ambientales mínimas que permitan aprovechar los efluentes sin realizar vertimientos a las fuentes de agua superficiales y reducir el fertilizante químico por el aprovechamiento del contenido de nutrientes presentes en los efluentes. La corporación revisa y aprueba la propuesta de investigación mediante el establecimiento del Convenio de Cooperación Estratégica No. PE.GDE.1.4.8.1.16.021 del 14 de septiembre de 2016.

Unipalma de los llanos S.A es una empresa cuya actividad económica está enfocada a la producción y venta de los derivados del aceite de palma, cuenta con 6.147 hectáreas de las cuales 4.449 hectáreas se encuentran en producción y están ubicadas en el kilómetro 25 vía Cumaral – Veracruz, departamento del Meta. Actualmente comercializa sus productos en países como: México, Perú, Brasil, España, Holanda e Italia. Para el tratamiento de los subproductos resultantes de los procesos de extracción en sus instalaciones, emplea el sistema de digestión anaerobia, Liew *et al.*, (2021) afirman que:

La industria del aceite de palma está orientada hacia la sostenibilidad al implementar la captura obligatoria de biogás para todas las plantas extractoras de aceite de palma en un esfuerzo por reducir los gases de efecto invernadero. Esta acción también indica que la digestión anaeróbica del efluente de la planta de aceite de palma (Palm oil mill effluent - POME) será una de las fuentes esenciales de biogás para la generación de energía.

Es decir, que además de permitir la reducción de agentes nocivos que serían un problema potencial si se vertieran a cuerpos de agua superficiales sin previo tratamiento, también permite la captura del biogás para disminuir los gases de efecto invernadero y al mismo tiempo, generar energías renovables. Dentro de los inconvenientes que se generan en las lagunas de estabilización es el proceso de colmatación de los sedimentos, disminuyendo el volumen disponible de almacenamiento, aunque se debe tener en cuenta que dichas partículas sólidas presentan un contenido orgánico que puede beneficiar los cultivos.

A partir de lo mencionado anteriormente y teniendo en cuenta que para alcanzar mayores producciones es fundamental analizar factores climatológicos que pueden generar una condición de estrés al cultivo, por ende, es necesario suplir con riego de forma eficiente los periodos de déficit. En Colombia esta práctica se ha convertido en una necesidad, a medida que transcurren los años la cantidad del vital recurso ha disminuido y las restricciones para su uso se incrementan como también los precios para adquirir la concesión, por tanto, se busca reducir el consumo excesivo a través de la optimización de los sistemas de riego, aplicando la cantidad de agua requerida por el cultivo y mejorando el transporte de nutrientes en el suelo, Rivera *et al.*, (2016) mencionan que:

El suministro de agua es el principal factor limitante del rendimiento de los cultivos de palma aceitera. Un déficit de agua afecta prácticamente todos los aspectos del metabolismo y la estructura de la planta, mientras que un exceso de agua conduce al anegamiento.

Paramanathan en el 2003 menciona que la precipitación anual debe estar comprendida de 2.000 a 2.500 mm, con más de 100 mm en todos los meses y un déficit hídrico anual menor a 200 mm; la distribución no adecuada a través del año genera condiciones no aptas para el cultivo, requiriendo riego suplementario. Diferentes investigaciones han demostrado las consecuencias de la falta de agua en la palma de aceite, los cuales presentan efectos en el crecimiento vegetativo y la fisiología de la planta hasta dos años después de haber presentado el estrés. (Corley y Hong 1981, citados por Lubis et al. 1993); estos se pueden expresar mediante la aparición de hojas jóvenes sin abrir completamente conocidas como flechas, además de sequedad y quebrazón de hojas viejas. La reducción de altura del estipe puede estar entre un 9 a 15% especialmente en palmas adultas (Foong 1993). Cuando aparecen agrietamientos en los suelos al secarse, se puede producir daño a las raíces superficiales e incluso la muerte (Lubis et al. 1993).

El déficit hídrico también tiene repercusiones sobre la fisiología de la palma, como el cierre estomático para reducir la transpiración lo que impide la absorción de CO₂ afectando la fotosíntesis (Mejía, 2000). Las palmas que cierran sus estomas por un lapso de 40 días al año podrían reducir su producción en un 10% (Corley,1982). La formación de inflorescencias masculinas y la inhibición de femeninas es propiciada por la sequía (Mejía, 2000); además puede formar frutos más pequeños y livianos, que se caen uno o dos meses antes de su desprendimiento normal, reduciendo el contenido de aceite en un 17 a 18% (Ochs & Liacopolus 1983, citados por Lubis et al. 1993).

Considerando las dos problemáticas descritas de forma previa, se plantea el riego por aspersión como una prueba piloto para dar solución a la evacuación periódica de los sedimentos que se colmatan en las lagunas de estabilización y al mismo tiempo, permite suplir el déficit hídrico y evitar la condición de estrés en el cultivo de palma que genera la disminución de la actividad fotosintética que según Lauteri *et al.*, (2014) es el mecanismo que usan las plantas para fijar energía y se regula a través de la apertura y cierre de los estomas.

Unipalma S.A busca obtener producciones más elevadas para satisfacer el incremento de la demanda mundial de los productos derivados del aceite de palma sin dejar de lado su responsabilidad con el medio ambiente y los ecosistemas con los que interactúa durante el desarrollo de sus actividades.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente proyecto de investigación está fundamentado en el planteamiento de una solución a un problema puntual para una empresa del sector agrícola en Colombia, aplicando criterios de diseño de ingeniería agrícola.

Descripción de la zona de estudio

La prueba piloto del diseño por aspersión está ubicada en la finca Santa Bárbara, situada al norte del departamento del Meta y limitando con el sur occidente del departamento de Cundinamarca. Específicamente en la vía que conduce a la inspección Veracruz desde el municipio de Cumaral. La altitud en la finca es de 232 m.s.n.m. y la temperatura ambiente de la zona oscila entre 22°C y 31°C, sus coordenadas geográficas están dadas al norte con una latitud 4° 13' 33" y al occidente con una longitud de 73° 15' 36".

Caracterización propiedades fisicoquímicas del efluente

Basado en los registros de producción que Unipalma suministró, se cuantificó el efluente disponible para su aprovechamiento y también, algunas muestras del efluente diluido y no diluido fueron enviadas al laboratorio **Agrilab** solicitando la evaluación de los parámetros mencionados en la Tabla 1 con su respectivo extractante, técnica de detección y la normativa, Agrilab es un laboratorio especializado en análisis fisicoquímicos para el sector agrícola, cuenta con acreditación ONAC, con código de acreditación 21-LAB-020 bajo la norma 17025 de 2017.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas solicitadas para evaluar al laboratorio Agrilab con su respectivo Extractante/Técnica/Documento Normativo.

PROP. FISICOQUÍMICA	EXPRESIÓN	Extractante/Técnica/Documento Normativo
Potencial hídrico	pH	Directo / Potenciométrico / NTC 5167
Densidad	N. A	Directo / Gravimétrico / NTC 5167
Conductividad Eléctrica 1:100	CE 1:100	Conductimétrico / SM 2510 B
Carbono orgánico Oxidable Total	COOx	Sln. Dicromato de Potasio / Colorimétrico / NTC 5167
Solidos Insolubles en agua	N. A	Directo / Gravimétrico / NTC 5167
Nitrógeno Orgánico	N Orgánico	Micro-Kjeldahl / Volumétrico / NTC 370
Fósforo Total	P ₂ O ₅	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / Colorimétrico / NTC 234
Potasio Total	K ₂ O	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / EAA / NTC 5167
Calcio Total	CaO	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / EAA / NTC 5167
Magnesio Total	MgO	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / EAA / NTC 5167
Azufre Total (como Sulfatos)	S-SO ₄ ²⁻	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / Colorimétrico / NTC 5167 - IGAC (1982) -NTC 1154 (r)

PROP. FISICOQUÍMICA	EXPRESIÓN	Extractante/Técnica/Documento Normativo
Hierro Total	Fe	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / EAA / NTC 5167
Manganeso Total	Mn	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / EAA / NTC 5167
Cobre Total	Cu	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / EAA / NTC 5167
Zinc Total	Zn	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / EAA / NTC 5167
Boro Total	B	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / Colorimétrico / NTC 5167
Sodio Total	Na	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / EAA / NTC 5167
Potasio Soluble	K ₂ O	Agua / EEA / NTC 516
Aluminio Total	Al	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / EAA / NTC 5167
Carbonatos	CO ₃ ²⁻	Sln. HCl 0,1N / Volumétrico / Método interno
Cloruros	Cl ⁻	Agua / Volumétrico / Método interno
Mercurio Total	Hg	EAM HNO ₃ : HCl AOAC:2006 / EAA-GH / EPA 7471 B
Cadmio Total	Cd	EAM HNO ₃ : HCl AOAC:2006 / ICP OES / EPA 6010D
Cromo Total	Cr	EAM HNO ₃ : HCl AOAC:2006 / ICP OES / EPA 6010D
Níquel Total	Ni	EAM HNO ₃ : HCl AOAC:2006 / ICP OES / EPA 6010D
Plomo Total	Pb	EAM HNO ₃ : HCl AOAC:2006 / ICP OES / EPA 6010D
CONVENCIONES	MVH Mineralización Vía Húmeda; EAA Espectroscopía de Absorción Atómica; EEA Espectroscopía de Emisión Atómica; ICP-OES Espectroscopía de Emisión Óptica de plasma acoplado Inductivamente; EAM Extracción Asistida con Microondas; AOAC Asociación Internacional de químicos analíticos	

La calidad del agua de riego fue importante analizarla para clasificar los posibles riesgos (Salinidad y sodicidad, obturación y toxicidad) que puedan afectar tanto al cultivo como al funcionamiento del sistema de riego con base al análisis de las propiedades fisicoquímicas del efluente.

- RIESGO POR SALINIDAD Y SODICIDAD

Se clasificaron los parámetros a partir de los lineamientos del departamento de agricultura de los estados unidos (USDA), en el caso de la salinidad, contenidos elevados originan disminución en la disponibilidad de agua en zona de raíces (Acevedo & Torres, 2008), el sodio fue necesario analizar debido a que afecta propiedades como la permeabilidad e infiltración del suelo (Pizarro, 1996). La relación de Absorción de Sodio se determinó empleando la Ecuación 1.

$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}} \quad (1)$$

Donde RAS= relación de adsorción de sodio (adimensional); Na= concentración de sodio (meq/L); Ca= concentración de calcio (meq/L); Mg= concentración de magnesio (meq/L).

- RIESGO POR OBTURACIÓN

La uniformidad de aplicación del agua de riego es un parámetro fundamental para evaluar al sistema, según Bedoya *et al.* (2018) en riego por aspersión y goteo, la uniformidad del riego evalúa la lámina de agua aplicada en la superficie del suelo (patrón de humedecimiento) y esta puede ser afectada por la obturación o taponamiento de los aspersores como consecuencia del uso de aguas muy sedimentadas o reacciones químicas entre algunos elementos presentes en el agua, por tanto, los parámetros que se analizaron fueron: la granulometría de las partículas (agentes físicos) y posibles precipitados (agentes químicos). Los valores de referencia con los que se clasificaron son los mencionados por Bucks y Nakayama en 1986.

- RIESGO POR TOXICIDAD

Pizarro en 1996 afirma que la toxicidad es un problema interno que se produce cuando ciertos iones son absorbidos por las raíces en su mayoría y mediante la transpiración se van acumulando en las hojas hasta alcanzar niveles perjudiciales. En el presente proyecto se analizaron los siguientes elementos: Sodio, Cloro, Boro, Aluminio, Cadmio, Mercurio, Cromo, Níquel, Plomo, Cobre, Zinc y Manganeso de acuerdo con las concentraciones máximas recomendadas por Pratt (1972).

Criterios de selección de los lotes

El área dispuesta por Unipalma S.A para el proyecto es de 38,09 hectáreas, la Figura 1 permite apreciar los lotes escogidos, siendo los más aledaños a las lagunas de estabilización donde son depositados todos los residuos generados durante la extracción del aceite crudo y sus derivados. La selección aledaña se hizo pensando en disminuir los costos de implementación de tubería y las pérdidas por fricción, además, de tener en cuenta que se prioriza la siembra del material híbrido. Este material alcanza niveles de producción superior y presenta menor susceptibilidad a enfermedades como la pudrición del cogollo (PC) (Avila *et al.*, 2016).



Figura 1. Lotes seleccionados para la prueba piloto en finca Santa Bárbara.

Levantamiento topográfico en los predios

Unipalma S.A contrató los servicios de la empresa AGRODINCO para realizar el levantamiento en las fincas de su propiedad, realizando el inventario de objetos espaciales e ilustrando la topografía del terreno mediante un modelo de elevación digital (MDE), la altimetría sirvió de base para determinar la afectación del relieve al diseño hidráulico. La metodología que se utilizó para determinar la altitud fue un sensor con sistema LiDAR aerotransportado por un Dron M600 pro, el cual genera una serie de pulsos de luz desviados por un espejo perpendicular a la trayectoria del Dron que, al entrar en contacto con los objetos o el terreno, refleja al sensor parte de la energía del pulso emitido y permite obtener la distancia al telémetro emisor, como resultado, entregó un MDE LiDAR en formato vectorial y para reducir las anomalías altimétricas generadas por vegetación de alta densidad, los puntos generados en la nube se comparan a un punto de control terrestre a través del equipo Trimble R8 GNSS RTK, además, permitió detallar en campo zonas como canales primarios, secundarios y naturales.

Propiedades físicas e hidrodinámicas del suelo

El estudio de las propiedades físicas e hidrodinámicas del suelo en la finca santa bárbara: textura, densidad aparente, curvas de retención de humedad e infiltración fue proporcionado por el centro de investigación en palma de aceite (Cenipalma), esto es debido al acompañamiento que brindó a Unipalma, permitiendo recopilar toda la información en una memoria técnica, mapas temáticos e información almacenada para su posterior proceso en sistemas de información geográfica (software Qgis); la metodología con la que determinaron las propiedades se detalla en la Tabla 2. Adicionalmente, se valida los datos obtenidos a través del software Soil Water Characteristic (SWC).

Tabla 2. Métodos empleados para determinar las propiedades físicas e hidrodinámicas.

PROPIEDAD FÍSICA E HIDRODINÁMICAS	MÉTODO
Textura	Método de la pipeta
Densidad aparente	Método del cilindro de volumen conocido
Curvas de retención de humedad	Método de la humedad gravimétrica
Infiltración	Método de los anillos concéntricos

Establecimiento del balance hídrico

Determinar las épocas de riego fue vital, por lo cual se recolectó y procesaron los registros históricos de las condiciones climatológicas de la zona para establecer el balance hídrico multianual y la lámina a reponer basado en un periodo crítico. La información del clima que se analizó fue obtenida a través de la estación automatizada Davis Vantage Pro, la cual se encuentra en operación desde el año 2016 reportando lecturas de precipitación acumulada diaria, intensidad de lluvia, presión atmosférica, temperatura ambiental, humedad relativa, velocidad y dirección del viento. Para el diseño del sistema de riego fue primordial analizar variables como la precipitación y evapotranspiración del cultivo, Según Patel *et al.*, 2017 los cultivos no logran aprovechar toda la precipitación caída, una parte se pierde por escorrentía, percolación profunda o evaporación, por

tal razón, se determina la precipitación efectiva (Pe). En el presente proyecto se empleó el método USDA (ecuaciones 2 y 3) debido a que fue desarrollado a partir de balances hídricos y tiene una relación directa con las entradas de agua y salidas por escurrimiento superficial.

$$Pe = \frac{Pp * (125 - 0,2 * Pp)}{125} \text{ si } Pp \leq 250 \text{ mm} \quad (2)$$

$$Pe = 125 + 0,1 * Pp \text{ si } Pp > 250 \text{ mm} \quad (3)$$

Donde Pe= precipitación efectiva (mm); Pp= precipitación probable (mm).

La precipitación diaria fue totalizada en periodos mensuales y fueron evaluados con una probabilidad de excedencia. Villazón *et al.*, en el año 2021 afirman que para un 20% de la precipitación probable se considera un año húmedo (PF20), para un 50% se contempla un año normal (PF50) y para un 80% representa un año seco (PF80). En este caso, se aplicó la probabilidad de excedencia del 75% basado en las afirmaciones de Bernardo (1989) y Chow (1964) quienes sugieren que para estudios con fines agrícolas es más acertada, el método probabilístico aplicado para el análisis estadístico fue el de la distribución normal o campana de Gauss, siendo adecuado para fines hidrológicos, en la ecuación 4 se expresa la función de densidad:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{1}{2} * \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (4)$$

Donde σ = desviación estándar (mm); e =base de los logaritmos neperianos; x = puntuación bruta; μ = media aritmética.

Posteriormente se analizó la evapotranspiración (ET), se decidió estimar la evapotranspiración de referencia (ETo) mediante el método FAO Penman-Monteith haciendo uso del software “ETo calculator” desarrollado por la división de tierras y agua de la FAO y se logró determinar el periodo crítico para el diseño agronómico, basado en al análisis mensual a partir de los datos históricos. La ecuación 5 ilustra todas las variables que son tenidas en cuenta para el cálculo del método propuesto.

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

Donde ETo=evapotranspiración de referencia (mm/día); Δ =pendiente de la curva de presión de vapor(kPa/°C); Rn =radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m²*día); G =flujo de calor de suelo (MJ/ m²*día); γ =constante psicrométrica (kPa/°C); T =temperatura media del aire a 2 m de altura (°C); u_2 =velocidad del viento a 2m de altura (m/s); e_s =presión de vapor de saturación (kPa); e_a =presión real de vapor (kPa); $e_s - e_a$ = Déficit de presión de vapor (kPa).

Diseño agronómico e hidráulico del sistema de riego por aspersion

- DISEÑO AGRONÓMICO

Una vez se caracterizaron las propiedades fisicoquímicas del efluente, las propiedades físicas e hidrodinámicas del suelo y condiciones climatológicas de la zona de estudio se procede diseñar agronómicamente, es decir, calcular de las necesidades de agua del cultivo, la frecuencia y se define la forma en que va a operar el sistema de riego, las ecuaciones empleadas serán ilustradas en la Tabla 3 con su respectiva numeración.

Tabla 3. Ecuaciones empleadas para el diseño agronómico.

FÓRMULA	PARÁMETROS	N°
$AFA = \frac{(CC - PMP)}{100} * Da * Pe * UR$	AFA= Agua fácilmente aprovechable (mm); CC= Capacidad de Campo (%); PMP= Punto de marchitez permanente (%); Da= Densidad aparente (g/cm ³); Pe= profundidad efectiva de raíces (mm); UR= umbral de riego (adimensional)	(6)
$Lb = \frac{AFA}{Ea}$	Lb= Lámina bruta (mm); Ea= Eficiencia de aplicación (adimensional); AFA= Agua fácilmente aprovechable (mm)	(7)
$Sa = 0,6 * DH$	Sa= separación de aspersores (m); DH=Diámetro húmedo (m)	(8)
$Sl = 0,7 * DH$	Sl= separación de laterales (m); DH=Diámetro húmedo (m)	(9)
$qA = \frac{Ib * Sa * Sl}{360}; qA'$	qA=caudal del aspersor (L/s); qA'=caudal del aspersor seleccionado (L/s); Ib= infiltración básica (cm/hr); Sa= separación de aspersores (m); Sl= separación de laterales (m)	(10)
$Na = \frac{Lt - Sa}{Sa} + 1$	Na= número de aspersores tramo crítico; Lt= longitud total lateral crítico (m); Sa= separación de aspersores (m)	(11)
$Qlat = Na * qA'$	Qlat=Caudal lateral crítico (L/s); Na= número de aspersores tramo crítico; qA'= caudal del aspersor seleccionado (L/s)	(12)
$Sa' = (DH * F * V * F * B) > Sa$	Sa'=Verificación Separación aspersores (m); DH=Diámetro húmedo (m); F. V= factor afectación del viento (adimensional); F. B= Factor número de boquillas aspersor (adimensional)	(13)
$Ia = \frac{360 * qA'}{Sa * Sl}$	Ia= Intensidad aplicación (cm/hr); qA'=caudal del aspersor seleccionado (L/s); Sa (m); Sa= separación de aspersores (m); Sl= separación de laterales (m)	(14)
$Fr = \frac{AFA}{ETc}$	Fr= frecuencia de riego (días); AFA=Agua fácilmente aprovechable (mm); ETc= evapotranspiración del cultivo (mm/día)	(15)
$Ad = \frac{A}{Fr}$	Ad= Área irrigada por día (hectárea/día); A= área total proyecto (hectáreas); Fr= frecuencia de riego (días)	(16)
$Ta = \frac{Lb}{Ia} + Tc$	Ta= tiempo de aplicación por posición (horas); Lámina bruta (cm); Intensidad aplicación (cm/hr); Tc=tiempo cambio (hr)	(17)
$Pd = \frac{To}{Ta}$	Pd= posiciones por día (Posición/día); To= tiempo de operación (hr); Ta= tiempo de aplicación por posición (hr)	(18)
$Aid = \frac{Ad}{Pd}$	Aid=Área irrigada por posición (hectárea/posición); Ad=Área irrigada por día (hectárea/día); Pd= posiciones por día (posición/día)	(19)
$Alat = \frac{Sl * Lt}{10000}$	Alat= Área irrigada por lateral (hectárea); Sl= seperación entre laterales (m); Lt= longitud total lateral crítico (m)	(20)
$Nlat = \frac{Aid}{Alat}$	Nlat= número laterales por posición (laterales/posición); Aid=Área irrigada por posición (hectárea/posición); Alat= Área irrigada por lateral (hectárea)	(21)
$Qsistema = (2,778) * \frac{A * Lb}{Fr * To}$	Qsistema=Caudal del sistema (L/s); A= área total proyecto (hectáreas); Lb= Lámina bruta (mm); Fr= frecuencia de riego (días); To= tiempo de operación (horas)	(22)

- DISEÑO HIDRÁULICO

El diseño hidráulico estuvo enfocado al dimensionamiento de la red de tubería distribuida por el área que se contempló en el diseño, pensando en reducir los costos de implementación y disminuir las pérdidas por fricción, para el presente diseño se utilizó la ecuación de Hazen-Williams (H-W) para predecir las pérdidas por su simplicidad matemática y los resultados obtenidos se encuentran en sus límites de validez.

Una vez establecidos los cálculos hidráulicos, se procede a modelar y simular mediante el software Epanet, el cual permite analizar y diseñar sistemas de distribución de agua, donde se modelan redes de tuberías, tanques, bombas, válvulas y otros componentes del sistema. En la Tabla 4 se presenta la ecuación de H-W y todas las ecuaciones que fueron necesarias para establecer el diseño hidráulico.

FÓRMULA	PARÁMETROS	Nº
$hf = 1,212 * 10^{12} * \left(\frac{Q}{C}\right)^{1,852} * \left(\frac{L}{D^{4,871}}\right) * F$	hf= Pérdidas por fricción (m.c.a); Q= Caudal (l ³ /s); C= Coeficiente de rugosidad (adimensional); L= Longitud de tubería (m); D = diámetro de tubería (mm); F= Factor de Christiansen (adimensional)	(23)
$HL = Ho + \frac{3}{4} \left(hf \pm \frac{S * L}{100} \right) + 0,15hf + He$	HL= Pérdidas a la entrada del lateral (m.c.a); Ho= Presión de operación aspensor (m.c.a); hf= Pérdidas por fricción (m.c.a); S= pendiente terreno (%); L= longitud de tubería (m); He= Altura del elevador (m)	(24)
$hm = 0,2 * Ho \pm \frac{S * L}{100}$	Hm= Pérdidas mínimas permisibles a la entrada del lateral (m.c.a); Ho= Presión de operación aspensor (m.c.a); S=Pendiente del terreno (%); L= longitud de tubería (m)	(25)
$HLoc = \Sigma Hm ; Hm = Kr * \left(\frac{V^2}{2g}\right)$	Hloc= Pérdidas localizadas o por accesorios (m.c.a); Hm= Pérdidas menores (m.c.a); Kr=coeficiente de resistencia (adimensional)	(26)
$Hb = HL + \Sigma Hfp + \Sigma HLoc \pm \frac{S * L}{100}$	Hb= Carga dinámica total del sistema (m.c.a); HL= Pérdidas a la entrada del lateral (m.c.a); ΣHfp = Sumatoria pérdidas en tubería principal (m.c.a); $\Sigma HLoc$ = Sumatoria de pérdidas localizadas o accesorios (m.c.a); S=pendiente del terreno (%); L= Longitud de tubería (m)	(27)
$HPb = \frac{Qrequerido * Hb}{76 * Eb}$	HPb= Requerimiento potencia de la bomba (Horse power); Qrequerido= Caudal requerido (L/s); Hb= Carga dinámica total del sistema (m.c.a); Eb= Eficiencia de la bomba (decimal)	(28)
$HPm = \frac{Qrequerido * Hb}{76 * Eb * Em}$	HPm= Requerimiento potencia del motor (Horse power); Qrequerido= Caudal requerido (L/s); Hb= Carga dinámica total del sistema (m.c.a); Eb= Eficiencia de la bomba (decimal); Em= Eficiencia del motor (decimal)	(29)

Tabla 4. Ecuaciones empleadas para el diseño hidráulico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- **Caracterización fisicoquímica del efluente**

PRODUCCIÓN DE ELFUENTE

A partir del análisis de producción de efluente de la planta extractora se determinó que por cada tonelada de fruta fresca procesada se genera 0,7 m³ de efluente utilizando el sistema del tricanter, resultados similares fueron reportados por Petitpierre (1981) con un rango de 0,4 a 0,7 m³ dependiendo de la cantidad de vapor utilizado para procesos de esterilización y la cantidad de agua adicionada a los aceites crudos para su clarificación. Teniendo en cuenta esto y la cantidad de días operados por la planta por mes se estableció que el mes donde más se genera efluente es abril con un caudal disponible de 5,07 L/s (Tabla 5).

Tabla 5. Producción de efluente anual

Detalle	Cantidad Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Producción fruta (Ton)	132,524	9,669	11,398	12,871	14,406	14,252	12,304	10,443	9,485	9,709	9,651	9,560	8,776
% Efluente generado	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%
Efluente (m3)	92,767	6,768	7,979	9,010	10,084	9,976	8,613	7,310	6,640	6,796	6,756	6,692	6,143
Días de operación	281	23	23	25	23	24	23	22	23	25	23	22	25
Producción efluente (m3/día)	330.6	294.3	346.9	360.4	438.4	415.7	374.5	332.3	288.7	271.8	293.7	304.2	245.7
Caudal Efluente (L/s)	3.83	3.41	4.02	4.17	5.07	4.81	4.33	3.85	3.34	3.15	3.40	3.52	2.84

Debido al análisis de calidad de agua del efluente detallado (Tabla 6), se definió la necesidad de diluirlo en agua para aumentar la capacidad de la superficie a regar y disminuir la concentración de los elementos químicos que afectan el desarrollo metabólico de la planta y contamina el suelo, afectando la productividad del cultivo. Teniendo en cuenta que para regar 38,09 hectáreas el sistema requiere un caudal de 52,5 L/s, es decir, que se sugirió una relación porcentual de dilución de 9,66% efluente (5,07 L/s) y 90,34% agua (47,43 L/s) para evaluar los parámetros necesarios en calidad de agua de riego.

CALIDAD DE AGUA DE RIEGO

En aguas residuales es fundamental evaluar aspectos sanitarios y en el caso de riego localizado, un factor de calidad muy importante es el riesgo por obturación (Pizarro, 1996). El análisis del efluente obtenido se evaluó a la salida de la laguna facultativa 2 del sistema de tratamiento y se clasificó el grado de amenaza según los criterios expuestos. La caracterización fisicoquímica del efluente se realizó sin dilución (Tabla 6) y con dilución en una relación porcentual 9,66% efluente – 90,34% agua (Tabla 7), en este último análisis no se evaluó la fracción mineral (carbonatos, cloruros y aluminio) debido a la disponibilidad del laboratorio donde fue enviada la muestra.

Tabla 6. Clasificación de criterios para calidad de agua de riego (efluente sin dilución).

Criterio	Índice	Expresión	Resultado	Unidades	Clasificación amenaza
Obturación	Potencial de hidrógeno	pH	8,93	Unidades pH	Alta
	Sólidos insolubles en agua	TDS	10100	mg/L	Alta
	Hierro	Fe	No detectado	mg/L	Sin amenaza
Salinidad y sodicidad	Conductividad eléctrica	CE	0,1	mmhos/cm	Baja
	Relación de adsorción de sodio	RAS	0,262	—	Baja
Toxicidad	Sodio	Na	1,17	meq/L	Sin amenaza
	Cloruros	Cl	31,5	meq/L	Alta
	Boro	B	13,5	mg/L	Alta
Oligoelementos	Aluminio	Al	24,4	mg/L	Alta
	Cadmio	Cd	No detectado	mg/L	Sin amenaza
	Mercurio	Hg	No detectado	mg/L	Sin amenaza
	Cromo	Cr	No detectado	mg/L	Sin amenaza
	Niquel	Ni	No detectado	mg/L	Sin amenaza
	Plomo	Pb	No detectado	mg/L	Sin amenaza
	Cobre	Cu	No detectado	mg/L	Sin amenaza
	Zinc	Zn	No detectado	mg/L	Sin amenaza
	Manganeso	Mn	No detectado	mg/L	Sin amenaza

Tabla 7. Clasificación de criterios para calidad de agua de riego (efluente con dilución).

Criterio	Índice	Expresión	Resultado	Unidades	Clasificación amenaza
Obturación	Potencial de hidrógeno	pH	8,13	Unidades pH	Alta
	Sólidos insolubles en agua	TDS	238	mg/L	Sin amenaza
	Hierro	Fe	18,3	mg/L	Alta
Salinidad y sodicidad	Conductividad eléctrica	CE	0,012	mmhos/cm	Baja
	Relación de adsorción de sodio	RAS	0,757	—	Baja
Toxicidad	Sodio	Na	1,22	meq/L	Sin amenaza
	Cloruros	Cl	Sin analizar	meq/L	-
	Boro	B	3,23	mg/L	Alta
Oligoelementos	Aluminio	Al	Sin analizar	mg/L	-
	Cadmio	Cd	0,107	mg/L	Alta
	Mercurio	Hg	No detectado	mg/L	Sin amenaza
	Cromo	Cr	No detectado	mg/L	Sin amenaza
	Niquel	Ni	No detectado	mg/L	Sin amenaza
	Plomo	Pb	No detectado	mg/L	Sin amenaza
	Cobre	Cu	No detectado	mg/L	Sin amenaza
	Zinc	Zn	No detectado	mg/L	Sin amenaza
	Manganeso	Mn	No detectado	mg/L	Sin amenaza

OBTURACIÓN: Según la clasificación de Bucks & Nakayama (1986) existe amenaza alta en los dos casos (diluido y no diluido) por pH, debido a que supera el valor de 7; sin embargo, el potencial de hidrógeno alto disminuye la disponibilidad del boro el cual es tóxico en concentraciones altas, Arias y Beltrán (2010) mencionan que, “la absorción de boro por las plantas se reduce cuando aumenta el pH del suelo encalado porque eleva la adsorción del elemento”. Además, los sólidos totales disueltos (TDS) representan una amenaza alta al superar los 2000 mg/L en la muestra no diluida, al diluir el efluente la concentración disminuye a 238 mg/L reduciendo el grado de amenaza, bajo criterios de diseño se decide implementar un sistema de filtrado por mallas que garantice la remoción de los agentes físicos no deseables. Inicialmente en el efluente sin dilución no se detectó el hierro, no obstante, en la muestra diluida presenta una concentración considerada como amenaza alta debido a que supera en rango planteado por Pizarro (1996) >1,5 mg/L.

SALINIDAD Y SODICIDAD: Según Richards, del *U.S Salinity Laboratory* en 1954 y la clasificación del Comité de Consultores U.C en 1972 (citado por Pizarro, 1996) en los dos casos el riesgo de salinidad es bajo. La FAO en 1976 (citado por Pizarro, 1996) con su nueva clasificación, cataloga los resultados ‘sin problemas’ al riesgo de salinidad. Mediante el diagrama para la Clasificación de las Aguas para Riego de Riverside U.S.D.A. (*SALINITY LABORATORY STAFF*), los resultados se clasifican en C1 S1; lo que corresponde a una clasificación salina baja (C1), apta para el riego en todos los casos; pueden existir problemas sólo en suelos de muy baja permeabilidad. La clasificación sódica es baja (S1), apta para el riego en la mayoría de los casos. Sin embargo, pueden presentarse problemas con cultivos muy sensibles al sodio.

TOXICIDAD: La toxicidad es un problema interno de la planta producido por determinados iones absorbido por las raíces que se acumulan en las hojas mediante la transpiración (Pizarro, 1996). La FAO en 1990 clasifica la amenaza de toxicidad en el agua de riego dependiendo del tipo de aplicación, para aspersión por la presencia de Cloro (Cl) >3 meq/L, Sodio (Na) >3 meq/L, y Boro (B) >3 mg/L, aunque diferentes investigaciones en cultivo de palma afirman que el cultivo tolera el Cl mientras que no sobrepase un umbral mayor a 10 meq/L que podría resultar letal para la planta (Barrios et al., 2003) y el B en concentraciones menores a 2 mg/L (Arias & Beltrán, 2010).

El efluente sin diluir presenta amenaza alta por toxicidad al índice de cloruros (31,5 meq/L), en el efluente diluido los cloruros no se analizaron, sin embargo, es necesario monitorear todos los parámetros mencionados; el sodio no representa una amenaza en ninguna de las muestras, a pesar de tener un leve aumento de 0,005 meq/L en el efluente diluido; para el caso del boro el efluente sin diluir alcanzó una concentración de 13,5 mg/L siendo un valor que representa un alto riesgo por toxicidad, al diluir se disminuyó 4,18 veces (3,23 mg/L) con respecto a la muestra no diluida, a pesar de ser menor continúa presentando un riesgo para el cultivo.

OLIGOELEMENTOS: Según Pratt (1972) el aluminio (Al) presenta amenaza en el efluente sin diluir al superar la concentración máxima recomendable para el riego (5 mg/L). El Al es tóxico en suelos ácidos (pH<5,5), en suelos con pH>7 el Al precipita y elimina la toxicidad. El suelo tiene un pH de 4,63, es decir, que el Al en esa concentración (24,4 mg/L) es tóxico, por lo cual no se debe aplicar sin diluir. En el efluente diluido no se determinó este parámetro, sin embargo, se debe validar si la concentración disminuye.

En el efluente diluido se detecta una concentración de cadmio superior al límite (0,01 mg/L) mencionado por Pratt (1972), de forma contraria, en la muestra sin dilución no se detectó presencia de este oligoelemento; esto se puede presentar debido a que las muestras no se tomaron el mismo día, por lo que puede variar las concentraciones dependiendo de las propiedades químicas del fruto procesado. Elementos como el mercurio, cromo, níquel, plomo, cobre, zinc y manganeso en ninguna de las muestras fue detectado, es importante tener en cuenta que existen agentes químicos dentro de los analizados que pueden deteriorar las tuberías metálicas usadas en los puntos de bombeo del sistema de riego a causa de la oxidación o corrosión.

- Caracterización de las propiedades físicas e hidrodinámicas del suelo

La textura predominante con un 58,93% de área es la franco arcillo limosa como se ilustra en la Figura 2, razón por la cual se toma la información referente para los parámetros de diseño (Tabla 8). Estos suelos se caracterizan por ser texturas medias o moderadas; Leiton (1985), menciona que para propósitos de riego los suelos que mejor se comportan son los francos, en vista de que los suelos arenosos retienen muy poca humedad, mientras que los arcillosos retienen porcentajes muy altos de humedad a tensiones altas, limitando la disponibilidad de agua para el cultivo.

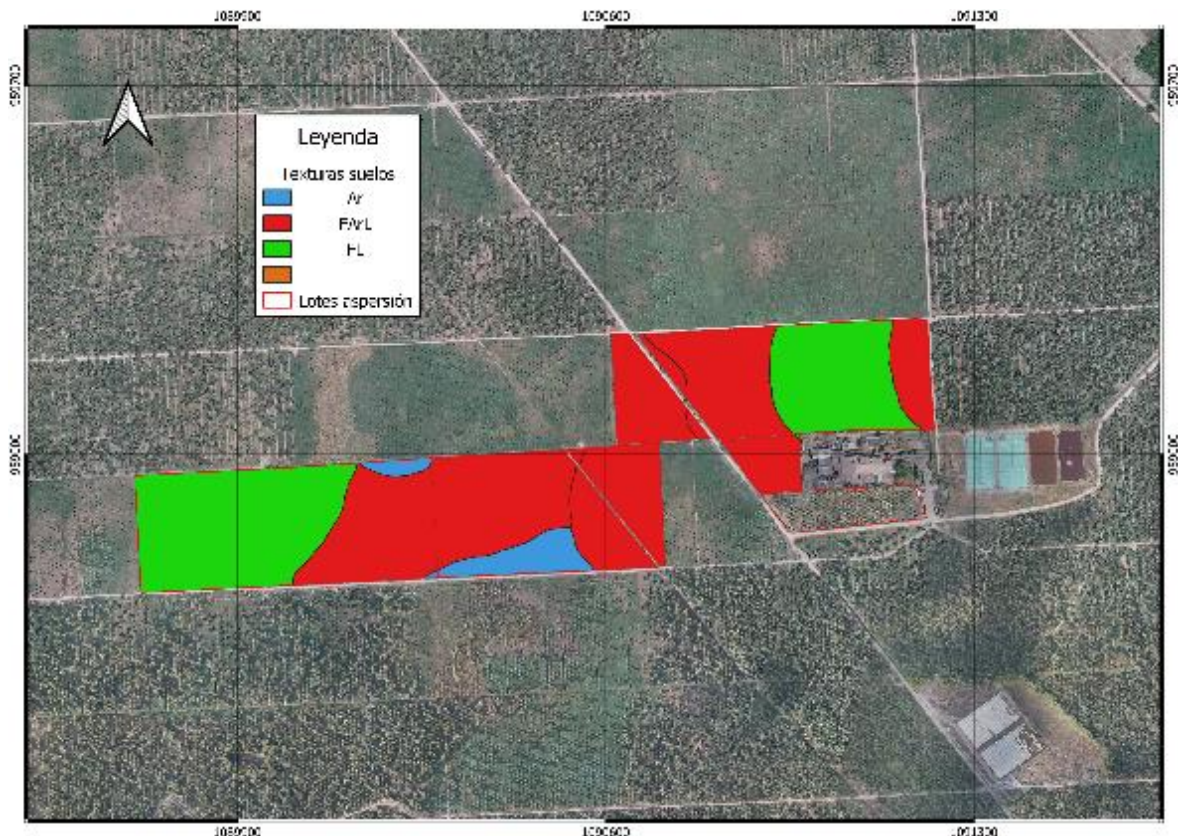


Figura 2. Distribución de texturas en lotes seleccionados.

Tabla 8. Características físicas e hidrodinámicas del suelo.

Textura	Área (Ha)	Área (%)	Características	Da (gr/cm ³)	Ib (mm/h)	CC (%)	PMP (%)	SAT (%)
Ar	1,86	4,87	Superficiales, pobre y muy pobremente drenados, texturas muy finas, presencia de un epipedón Úmbrico	1,160	3,302	44,7	34,4	56,2
FArL	22,45	58,93	Moderadamente superficiales, pobre a imperfectamente drenados, texturas finas, presencia de plintita	1,323	7,870	35,9	17,3	50,0
FL	13,79	36,20	Superficiales, limitados por compactación del material de suelo; bien y moderadamente bien drenados,	1,364	8,636	33,8	16,9	48,5

La relación entre la densidad aparente del suelo (Da) y el grado de restricción para el crecimiento de raíces dependiendo de la textura del suelo según Ferreyra y Selles (2016), indica que se encuentra por encima del rango de valor ideal ($<1,1 \text{ g.cm}^{-3}$), sin embargo, no presenta afecciones en el desarrollo radicular ($>1,55 \text{ g.cm}^{-3}$). Este suelo no manifiesta problemas en condiciones de retención de humedad ni compactación.

La capacidad que tiene el suelo de retener el agua a una tensión de 33 KPa sin que se percole o drene, se encuentra a 35,9% es decir, que 100 gr Ss (gramos de suelo seco) retiene 35,9 gramos de agua; la planta estará en punto de marchitez permanente a una tensión de 1500 KPa cuando contenga 17,3 gramos de agua o menos en 100 gr Ss y estará en estado de saturación, es decir, cuando los macros y microporos estén llenos de agua y haya drenaje natural al contener 50 gramos de agua en 100 gr Ss.

La infiltración básica de la textura predominante es de 7.87 mm/h se clasifica como “moderadamente lenta” según el IGAC (1990). Teniendo en cuenta que la tasa de aplicación del aspersor es de 7.74 mm/hr, en el 95.13% del área diseñada no se producirá escorrentía a menos que haya alguna barrera física según lo dicho por Úbeda & Delgado en el año 2018.

Los resultados entregados por Cenipalma, fueron analizados en el software SWC (Figura 3), encontrando valores similares en todas las propiedades físicas e hidrodinámicas para la textura predominante con la que se diseña agronómicamente el sistema de riego.

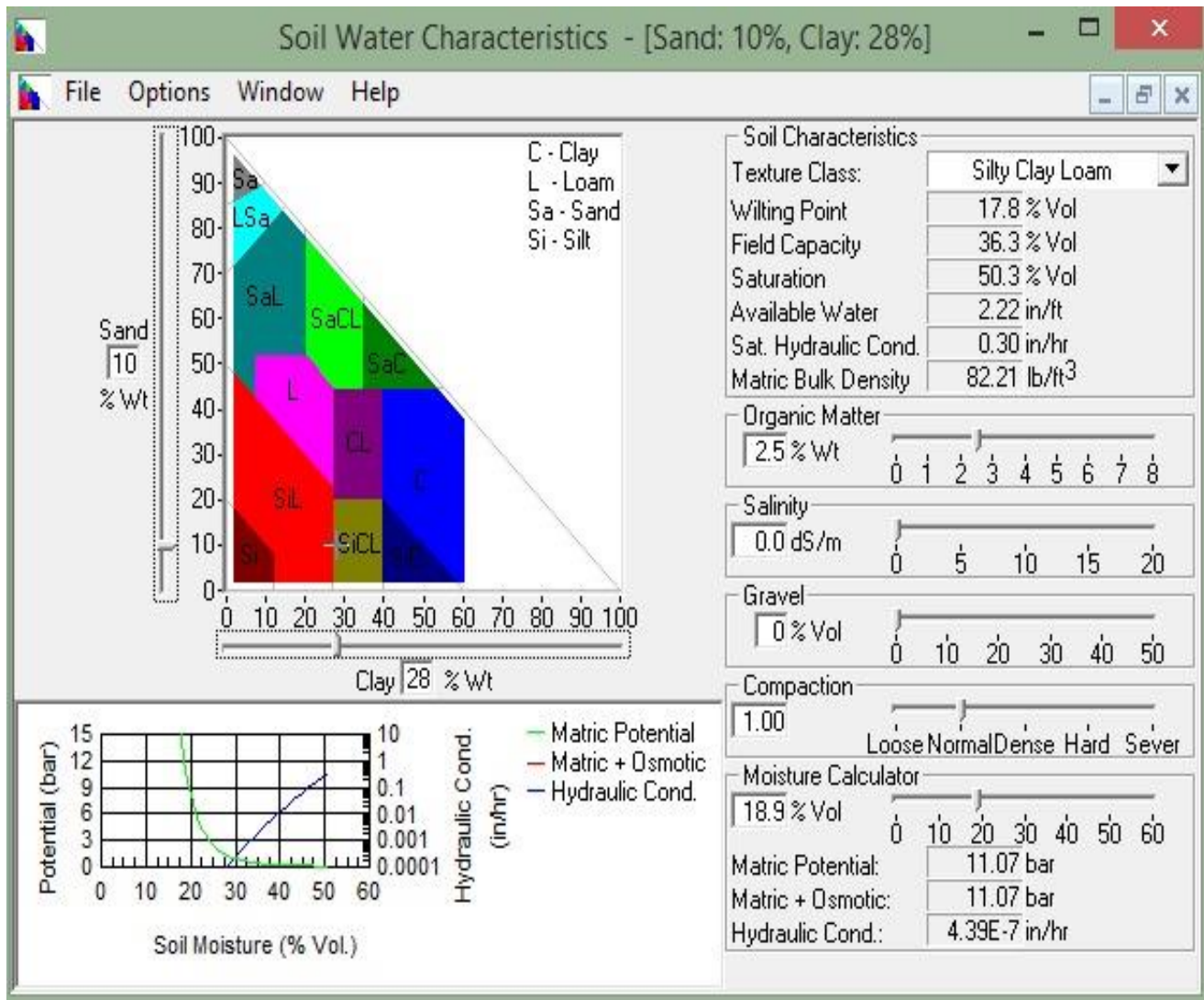


Figura 3. Validación de resultados en el software SWC.

- **Establecimiento del balance hídrico**

La precipitación promedio anual para la zona de estudio es de 2.266 mm, lo cual es ideal para el cultivo de palma de aceite según el rango mencionado (2.000 a 2.500 mm) por Paramanathan en el 2003. Según la Tabla 9 los meses con menor cantidad de lluvia (<100 mm) son diciembre, enero y febrero, los siguientes meses del año presentan precipitaciones superiores a 160 mm; los meses más lluviosos (>250 mm) son abril, mayo, junio y julio. Este comportamiento corresponde al descrito por Garzón *et al.*, (2013) donde afirman que “el piedemonte del departamento del Meta (Colombia) presenta un régimen pluviométrico monomodal, en el cual la

temporada de lluvias comprende desde marzo hasta noviembre y la época seca desde diciembre hasta finales de febrero con un alto déficit hídrico”.

Tabla 9. Análisis de la precipitación y balance hídrico multianual.

Periodo de estudio	Precipitación (mm)											
	Año/mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov
2017	56.0	76.4	220.8	267.2	352.6	253.8	137.2	186.4	201.2	315.4	141.8	56.8
2018	52.2	0.4	169.8	242.4	341.2	313.4	282.2	219.6	151.6	323.0	112.6	10.4
2019	0.2	0.2	68.2	205.6	304.6	277.0	206.0	318.8	69.8	143.6	144.0	32.2
2020	8.6	2.0	139.4	221.6	419.6	335.6	282.8	197.6	204.2	271.2	153.4	45.4
2021	9.8	37.8	182.6	604.0	243.6	181.4	222.0	91.6	49.6	23.2	1.6	68.6
2022	139.0	99.8	574.2	228.4	437.0	326.4	544.8	230.4	327.2	223.4	207.6	6.0
Media	44.3	36.1	225.8	294.9	349.8	281.3	279.2	207.4	167.3	216.6	126.8	36.6
Desv. Estandar	52.1	43.4	178.2	152.9	71.9	57.9	141.0	73.5	101.7	115.6	68.8	25.1
z (75%)	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Pp 75% mm	79.4	65.4	346.0	398.0	398.3	320.3	374.2	257.0	235.8	294.6	173.2	53.5
Pe (USDA) mm	69.3	58.5	159.6	164.8	164.8	157.0	162.4	150.7	146.8	154.5	125.2	48.9
ETo (Penman Monteith) mm/mes	115.8	115.9	119.6	108.9	102.4	92.8	98.9	110.2	115.1	115.6	104.4	113.5
Exceso/déficit (mm/mes)	-46.4	-57.3	40.0	55.9	62.4	64.2	63.5	40.5	31.8	38.9	20.8	-64.6

Con el análisis estadístico se determinó la precipitación probable de excedencia del 75% para establecer la probabilidad de lluvias multianual detallada por mes en la Tabla 9 y posteriormente la precipitación efectiva siendo la utilizada para establecer las necesidades de riego al cultivo excluyendo la escorrentía, percolación profunda y evaporación de la superficie del suelo.

En la Tabla 10 se muestra las evapotranspiraciones de referencia promedio por mes obtenidas a partir de los reportes históricos del clima a través del software EToCalculator (Método Penman monteith), siendo el valor crítico 4,68 mm/día en el mes de febrero del año 2017, según

Arias y Zapata en el año 2019, el coeficiente del cultivo (Kc) en etapa productiva es 1, por ende, la evapotranspiración del cultivo (ETc) para el periodo crítico de diseño es 4.68 mm/día.

Tabla 10. Análisis multianual evapotranspiración de referencia.

Mes/año	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Media mensual
Enero	-	3.96	3.64	3.56	3.47	3.64	4.14	3.73
Febrero	-	4.68	4.05	4.02	3.94	3.99	4.02	4.11
Marzo	-	4.06	3.85	3.64	3.97	3.78	3.84	3.86
Abril	-	3.97	3.30	3.54	3.49	3.74	3.74	3.63
Mayo	-	3.56	3.26	3.23	3.07	3.35	3.35	3.30
Junio	-	3.28	2.85	2.86	3.13	3.21	3.23	3.09
Julio	-	3.19	3.14	3.13	3.12	3.09	3.47	3.19
Agosto	-	3.96	3.43	3.29	3.31	3.59	3.75	3.55
Septiembre	-	4.09	3.72	3.75	3.72	3.89	3.84	3.84
Octubre	4.04	3.73	3.60	3.47	3.60	3.84	3.82	3.73
Noviembre	3.74	3.84	3.34	3.24	2.91	3.76	3.53	3.48
Diciembre	3.91	4.10	3.46	3.23	3.12	3.94	3.87	3.66

Según el centro de investigación en palma de aceite (CENIPALMA) en su informe de labores del año 2017, en la zona oriental colombiana la evapotranspiración de referencia analizada durante 4 años estuvo por debajo de 4 mm/día y en el periodo comprendido entre diciembre de 2015 a febrero de 2016 superó los 5 mm/día.

Finalmente, para establecer las épocas de riego multianual se grafica la precipitación efectiva y la evapotranspiración del cultivo mensual y así definir el balance, es decir, los periodos de lluvias o déficit (Figura 4).

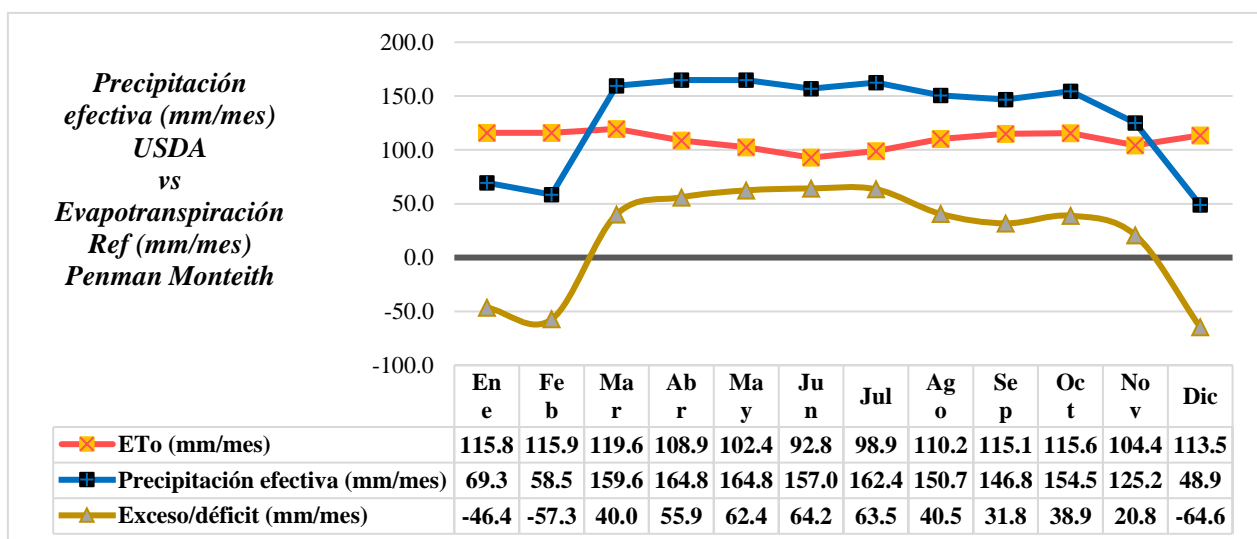


Figura 4. Balance hídrico multianual – Finca Santa Bárbara.

- **Diseño agronómico e hidráulico del sistema de riego por aspersión**

En el diseño agronómico se tuvo en cuenta algunos parámetros para garantizar la uniformidad del riego (Tabla 11). Según Fry & Gray en 1971 la eficiencia de aplicación del agua en los sistemas por aspersión está determinada por las condiciones climáticas de la región, la zona de diseño tiene un clima tropical húmedo, por lo cual, le corresponde un valor del 80% como seguridad. Otro factor para tener en cuenta es la velocidad del viento, Martínez *et al.*, (2010) mencionan que esta variable puede afectar la uniformidad de la distribución de agua, las pérdidas por evaporación y arrastre del riego; por consiguiente, se han establecido porcentajes para el correcto espaciamiento de aspersores en condiciones específicas de la velocidad del viento como lo cita Coras (2000); sin embargo, al ser un cultivo de material híbrido, donde la densidad foliar es superior a una variedad guineensis, se asume un porcentaje de 65% considerando que no hay velocidades de viento significativas dentro del cultivo.

Tabla 11. Parámetros de diseño.

Descripción	Cantidad
Área (hectáreas)	38.09
Región climatológica (Ea) (%)	80
Velocidad del viento (km/h) – Factor de seguridad (65%)	8.1
Pendiente N-S (Lateral subiendo) (%)	0.34
Pendiente E-W (Principal subiendo) (%)	0.36
Coefficiente de rugosidad PVC	150
Altura del elevador (He) (metros)	1.5
Tiempo disponible de operación (Td) (horas)	12
Separación de aspersores (Sa) (metros)	13.5
Separación de laterales (Sl) (metros)	15.6
Longitud total lateral crítico (metros)	115

Hidráulicamente existen las pérdidas de carga necesarias de evaluar para el correcto funcionamiento del sistema, por esto, es importante calcular las pérdidas por fricción con cierta precisión; diferentes autores han investigado y determinado fórmulas dedicadas al diseño hidráulico, como es el caso de la ecuación de Hazen – Williams en 1993 que establece coeficientes de rugosidad (C) dependiendo el tipo de material, para el diseño se eligió un coeficiente de 150 para PVC, debido a que cumple con los criterios para aplicar esta ecuación, donde se recomienda usar en caso donde el diámetro supera 1 pulgada y no excede 72 pulgadas, además de utilizar valores de velocidades inferiores a 3,05 m/s (Alegret & Martínez, 2019). Adicionalmente la topografía tiene un grado de influencia en las pérdidas; la pendiente del terreno es relativamente plana según la FAO (2009) con un 0,34% N-S y 0,36 E-W se considera un gradiente de pendiente a nivel. En la Figura 5 se ilustra el relieve del terreno de los lotes seleccionados.

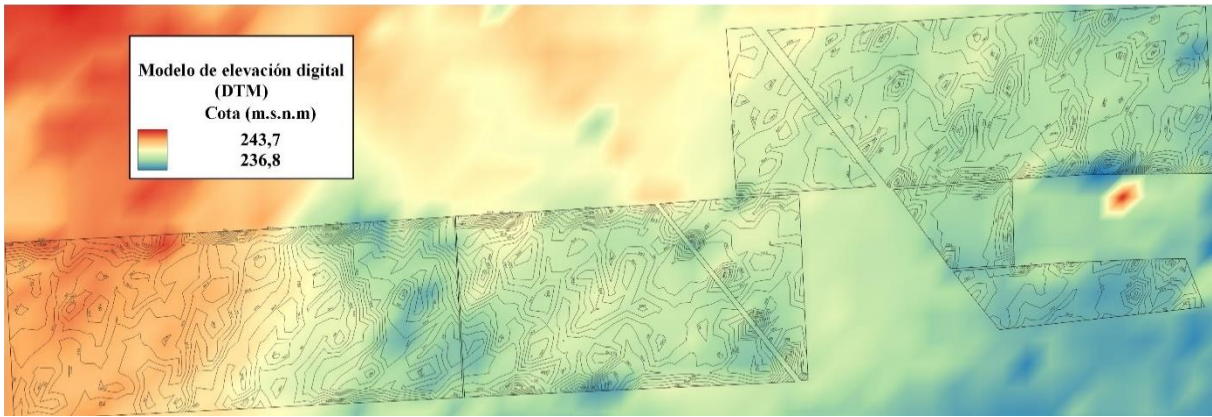


Figura 5. Modelo de elevación digital

La altura del elevador se determina en base a el tamaño de la planta y el tipo de aspersor seleccionado para garantizar el traslape y la uniformidad en el humedecimiento, el elevador tiene una altura de 1.5 metros para ir enterrado 0.5 metros aproximadamente para el soporte del aspersor. El distanciamiento de los aspersores está determinado por el diámetro húmedo y el marco de plantación que es a 9 metros por 9 metros por el método de siembra tres bolillos. La distribución de los aspersores está configurada para regar tres palmas por aspersor con laterales cada dos líneas de palma para no afectar las labores cultivos como la cosecha como se ilustra en la figura 6.

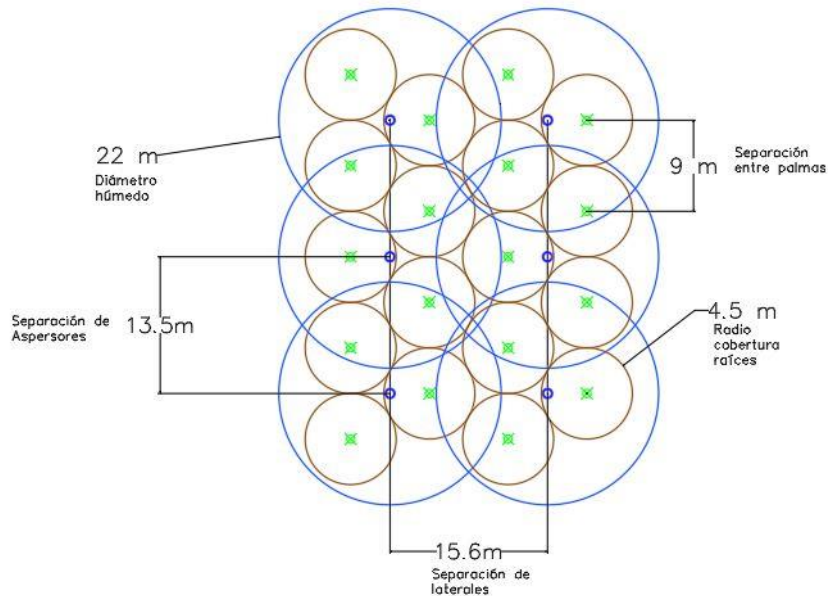


Figura 6. Esquema de disposición de emisores dentro del cultivo

Para la selección del aspersor se tiene en cuenta el espaciamiento entre aspersores, la presión de trabajo, y que la tasa de aplicación no supere la velocidad de infiltración y así evitar encharcamiento. En la Tabla 12 se detalla las características del aspersor seleccionado.

Tabla 12. Características del aspersor DNET 9575

Descripción	Unidad	Cantidad
Caudal del aspersor	l/s	0.45
Tasa de aplicación	mm/hora	7.74
Presión operación del aspersor	m.c.a	20.42
Número de boquillas	Und	2
Diámetro boquillas	mm	5,10 + 2,5
Diámetro húmedo	Und	22.00
Diámetro entrada aspersor	Pulgadas	3/4"
Número de aspersores del lateral	Und	8
Longitud de humedecimiento	m	114.75
Caudal requerido del aspersor (qa)	l/s	0.46

Se utilizó el aplicativo libre NetSpex de Netafim para validar el coeficiente de uniformidad (CU - 89,1%), distribución (DU- 88,4%) y programación de riego (SC – 1,67%) teórico según el fabricante, Tarjuelo en 1999 recomienda los siguientes rangos CU>88%, DU>79%, SC<1,5%, este último, se encuentra fuera del rango, sin embargo, el mismo autor lo considera como un valor aceptable.

El CU se enfoca en la cantidad de agua distribuida en diferentes partes del campo, mientras que el DU se enfoca en la distribución espacial del agua. Ambos coeficientes son importantes para evaluar la eficiencia y la uniformidad del riego y son útiles en la gestión del riego para garantizar que los cultivos reciban una cantidad adecuada y uniforme de agua. El SC mide cuánto se debe regar en exceso para mojar el área más seca, es decir, un multiplicador de tiempo.

Además, el aplicativo NetSpex permite evaluar el comportamiento de la tasa de aplicación a lo largo del radio húmedo del aspersor como se observa en la Figura 7; la disminución de la tasa de aplicación se evidencia a partir de los 6 metros, por esto, fue necesario garantizar el traslape entre laterales y aspersores.

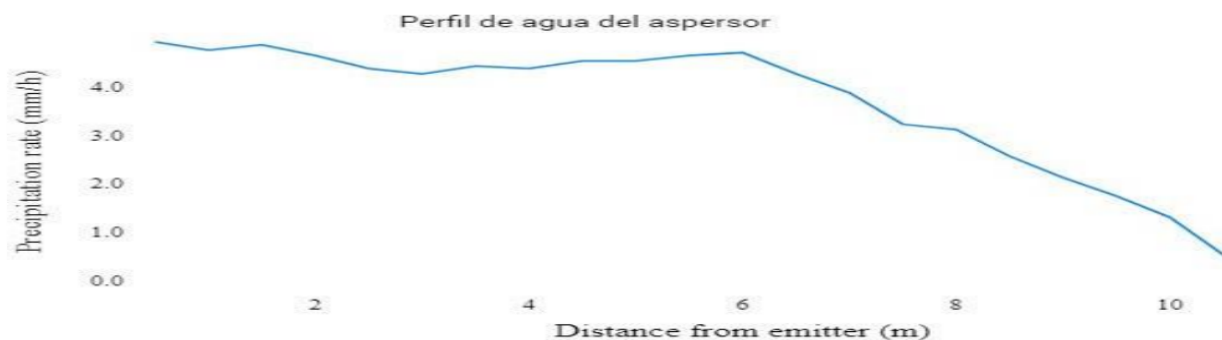


Figura 7. Perfil de distribución del agua del aspersor D-NET 9575-24D
Fuente: Aplicativo NetSpex, Netafim

Determinar el contenido de agua del suelo es fundamental para el estudio y manejo del riego en los cultivos, ya que con base en esta característica se establecen la frecuencia de riego y la lámina de agua a reponer (Gurovich, 2003). Según las propiedades físicas del suelo y la profundidad efectiva de raíces, para el diseño la lámina de agua que fácilmente puede aprovechar la planta es 65.52 mm para una frecuencia de riego de 14 días (Tabla 13), tradicionalmente en Unipalma las frecuencias de riego son de 8 a 15 días en sistemas de riego por gravedad basado en el contenido de humedad que se observa en campo.

Tabla 13. Resultados diseño agronómico

Descripción	Unidad	Cantidad
Agua fácilmente aprovechable AFA	mm	66.44
AFA ajustada (AFA')	mm	65.52
Lámina bruta ajustada (Lb')	mm	81.90
Frecuencia de riego Fr	días	14.00
Área irrigada por día (Ad)	Ha/día	2.72
Tiempo de riego por posición (Ta)	horas	11.28
Posiciones por día (Platd)	Und	1.00
Área irrigada por lateral (Alat)	Ha/lat	0.17
Número de laterales a trabajar por día (Nlat)	Und	16.00
Número de aspersores por posición	Und	128.00
Caudal del lateral crítico	l/s	3.62
Capacidad del sistema para tiempo de aplicación (Q)	l/s	57.98

El dimensionamiento hidráulico determina el diámetro de la tubería según el caudal requerido y las pérdidas por fricción que se generen tomando como referencia las pérdidas mínimas permisibles. Para operar el sistema se requiere 46,36 Hp en la bomba; 49,53 Hp del motor y una carga total de 48,915 m.c.a. Se selecciona una electrobomba marca Barnes modelo GSGE4B-500 con una presión máxima de 61 m.c.a y caudal máximo de 78 litros por segundo, la cual, cumple

con el requerimiento de la carga total del sistema que incluye las pérdidas a la entrada del lateral, pérdidas por fricción, pérdidas localizadas, carga estática, y pérdidas por la reducción en la succión.

Las pérdidas localizadas contemplan los accesorios tales como codos, tees, válvulas, que generan una pérdida de presión de 3,667 m.c.a., además, del sistema de filtrado el cual, es de tipo malla de 500 micras, con retro lavado automático que adiciona 5 m.c.a de pérdidas al sistema de riego. La tubería principal inicia en 8" y al momento de distribuir a los múltiples se reduce en 6", 4", 3" y 2", los laterales son de 2", 1 ½" y 1".

Tabla 14. Resultados diseño hidráulico

Descripción	Unidad	Cantidad
Presión a la entrada del lateral (HL)	m.c.a	23.167
Pérdidas en tubería principal (Hfprin)	m.c.a	5.830
Pérdidas por accesorios o localizadas (Hloc)	m.c.a	8.667
Carga estática	m.c.a	3
Pérdidas por la reducción en la succión	m.c.a	1.94
Carga total del sistema (Hb) (F.S. 15%)	m.c.a	48.9
Requerimiento de Potencia Bomba	Hp	46.360
Requerimiento de Potencia Motor	Hp	49.530

Empleando el software Epanet (Figura 7) se logró dimensionar el sistema cumpliendo con los criterios de presión mínima requerida, es decir, la presión de operación nominal del aspensor, y la velocidad del fluido la cual no debe estar por debajo de 0,5 m/s y no superar los 2 m/s siendo esto, un criterio definido por los diseñadores (Figura 8), según Conagua (2019) para evitar depósitos de sólidos en la tubería la velocidad mínima permisible es de 0,3 m/s y la velocidad máxima para evitar la erosión en las paredes debe ser 5 m/s en tubería de PVC.

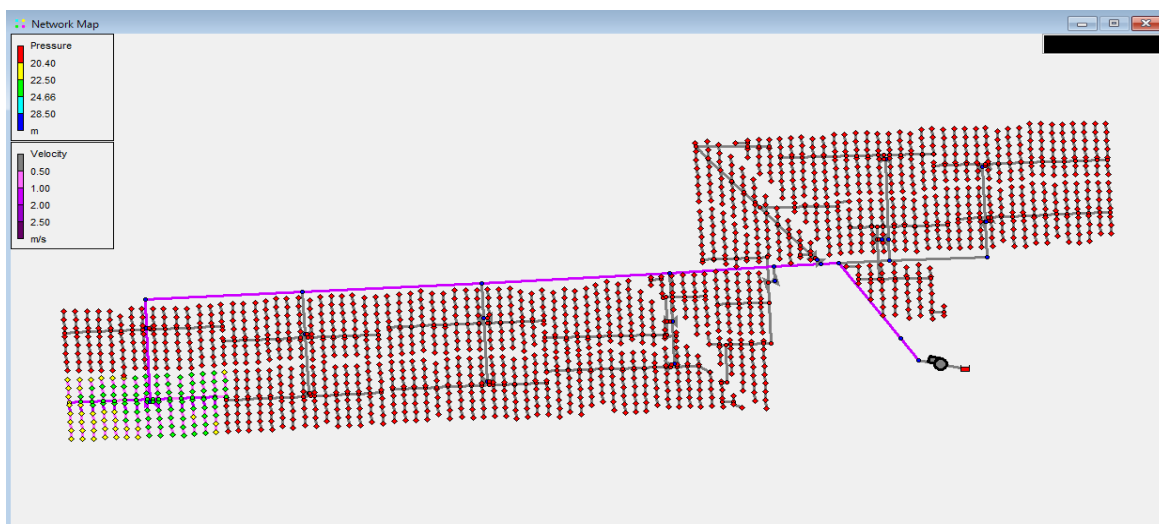


Figura 8. Comportamiento de velocidad y presión en turno crítico.

El turno más alejado de la zona de bombeo y con mayor elevación de terreno, se denomina “turno crítico”, para el presente diseño es el turno 2 (Figura 9), cuya presión mínima disponible para la operación es de 21,30 m.c.a garantizando que sea mayor a 20,4 m.c.a que es la presión a la que debe trabajar el aspersor, la presión máxima es de 24,68 m.c.a. y la velocidad de conducción del fluido se encuentra en un rango entre (0.66 - 1,62) m/s. En el caso del turno más cercano a la zona de bombeo (turno 12) tiene un presión mínima de 23.47 m.c.a y una máxima de 27.74 m.c.a, la velocidad máxima es de 2 m/s y la mínima es de 0,6 m/s. Cabe resaltar que la presión se controla a través de válvulas reguladoras de presión marca Dorot serie 90, mejorando la uniformidad de distribución del caudal en cada turno.

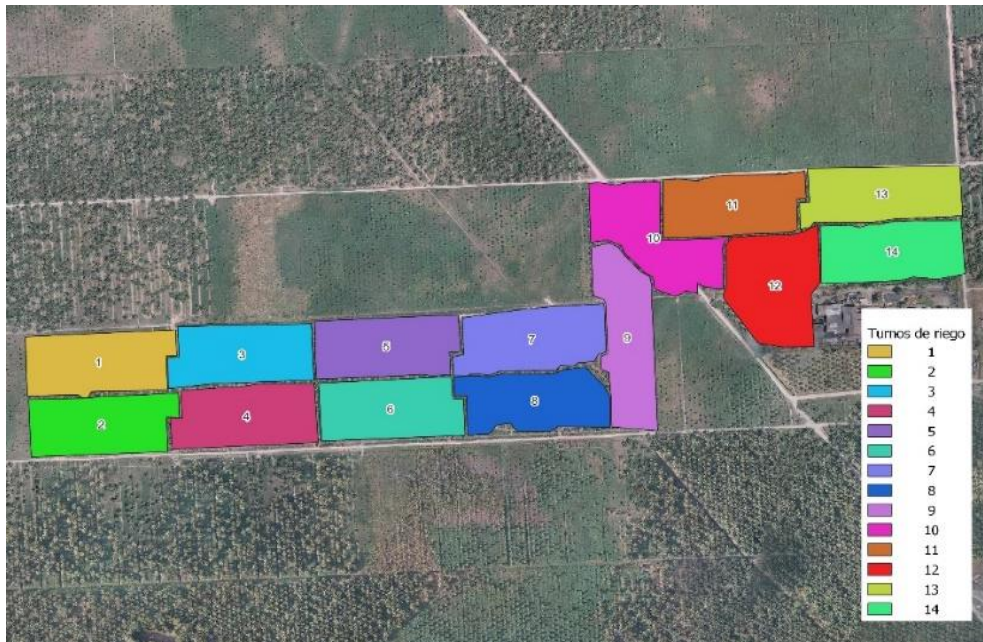


Figura 9. Turnos de riego

La uniformidad de distribución obtenida con base a la simulación en todos los turnos fue superior al 95%, las variaciones del caudal real vs el teórico se encuentran en un rango entre el 5,3% - 8,6% con una media de 6,3%, esto se detalla en la tabla 15, donde se puede evidenciar que a medida que aumenta la variación del caudal respecto al diseñado, disminuye la uniformidad de distribución en el turno, esto debido a las irregularidades del terreno, presión de regulación en la válvula y la selección del diámetro en la tubería.

Tabla 15. Resultados obtenidos en Epanet por cada número de turnos

Turno	Presión aguas arriba válvula (m.c.a)	Presión de regulación aguas abajo válvula (m.c.a)	Nº Emisores	Caudal teórico (lps)	Caudal simulado EPANET (lps)	Variación Caudal (%)	UD% simulado
1	26.11	24.5	116	52.5	55.8	6.3%	97.4
2	24.94	24.5	116	52.5	55.39	5.5%	98.0
3	29.73	25	116	52.5	55.89	6.5%	97.0
4	29.1	25	116	52.5	56.3	7.2%	98.0
5	33.68	25	116	52.5	55.2	5.1%	98.6
6	33.8	25	116	52.5	55.48	5.7%	98.0
7	36.15	25	116	52.5	55.43	5.6%	97.4
8	35.51	25	116	52.5	55.4	5.5%	96.2
9	37.75	25	116	52.5	55.3	5.3%	96.7
10	38.79	27.5	116	52.5	56.9	8.4%	95.0
11	36.26	24.5	116	52.5	55.52	5.8%	96.8
12	37.76	26	116	52.5	57.01	8.6%	96.0
13	35.81	25	116	52.5	56.06	6.8%	97.3
14	37.63	25	116	52.5	55.65	6.0%	98.0

- Análisis de costos

Es crucial llevar a cabo un análisis de costos, ya que este proceso permite evaluar la viabilidad del proyecto. A pesar de que la inversión inicial en un sistema de riego por aspersión es significativamente mayor que la de un sistema de riego por gravedad, a largo plazo el beneficio se evidencia en el incremento notable de la eficiencia del sistema, la capacidad de realizar riegos en los momentos más propicios y, finalmente, un considerable aumento en la producción, lo que contribuye a la recuperación de dicha inversión.

Diferentes autores han afirmado dicho aumento de la producción, como Foong en 1993 que desarrolló un estudio lisimétrico en Malasia obteniendo como resultado un rendimiento promedio anual de aceite del mesocarpio de 63,5 kg/planta sin presencia de déficit hídrico, comparada a 48,1 kg/planta en palmas sin riego (un aumento del 32%), adicional un incremento del 29,9% en la relación almendra - racimo con un buen riego. Para el caso de Colombia, López en el año 1991 menciona que la zona norte, central y oriental presentan baja precipitación mensual durante los meses de noviembre a abril y se correlaciona con el descenso en el rendimiento de racimo de fruta fresca (RFF).

Los costos del suministro de materiales e instalación del sistema se presentan en la Tabla 15, obteniendo que la distribución porcentual de los subsistemas se compone de la siguiente manera: 48% para la unidad de riego, 31% conducción, 12% mano de obra, 6% bombeo y 3% filtrado. El costo por hectárea es de \$15,623,386.66 m/cte COP. Los precios de los materiales

fueron solicitados a diferentes proveedores, el costo de la mano de obra se consultó con empresa contratistas de la zona, al igual que el costo por hectárea con empresas especializadas en instalaciones de riego donde el valor se encuentra en el rango promedio.

Tabla 15. Presupuesto de instalación del sistema de riego

SUBSISTEMA	COMPONENTES DEL SISTEMA	VALOR
Bombeo	Suministro de material para instalación del sistema de bombeo, incluye 1 Motor y Electro bomba centrifuga Barnes GSGE4B-500 1200 gpm ; H:61 psi La succión se contempla en 8" la cual incluye una válvula de pie de 8", tubería metálica con su respectivo soporte y dos reducciones excéntricas. La descarga en 8" que incluye una válvula mariposa, un manómetro, una válvula de alivio de 3" y dos válvulas de aire para la protección de la red.	\$ 33,432,251.61
Filtrado	1 Filtro de malla Screenguard 500 micros con manifold de entrada y de salida en 8" con válvulas mariposa aguas arriba y aguas abajo de cada filtro. Incluye un medidor de caudal, válvula cheque y un cuello de cisne. Incluye accesorios en pvc para la salida del retrolavado	\$ 20,241,647.77
Unidad de riego	Suministro de material para 14 válvulas hidráulica 6" serie 90 - Netafim Qmax:350m ³ /h, cada arco cuenta con válvula de aire. Incluye tubería distribuidora en 6", 4", 3" RDE 51 y 2" RDE 32.5, laterales en 2", 1 1/2", 1" RDE 21, se contemplan tees, collares de derivación y lavados, además, de 1624 aspersores Netafim Dnet 9575 . No se contempla antirrobo	\$ 286,604,411.94
Conducción	Corresponde al material necesario para la instalación de la red principal de PVC (tuberías de 8" RDE 51). Se incluyen accesorios de conexión como tees, codos, semicodos y válvulas de alivio de aire combinadas para protección de red principal. Se contemplan 2 registros de control de 8".	\$ 186,416,486.64
Mano de obra	Se contempla la instalación de los materiales descritos en el presupuesto, sin incluir construcción de caseta de bombeo.	\$ 68,400,000.00
Total		\$ 595,094,797.96

CONCLUSIONES

- Basado en las características físicas y químicas de la dilución de agua-efluente propuesta en la presente investigación, se logra una opción viable ambientalmente y una alternativa efectiva para evacuar los lixiviados generados por la extracción de aceite de palma, pero con restricciones de manejo, evaluando continuamente las características químicas del suelo por la aplicación del efluente, debido a su variabilidad en función de las condiciones específicas de los racimos de fruta fresca procesada.
- La zona de estudio exhibe un régimen monomodal con una marcada tendencia de déficit hídrico que se extiende de 3 a 4 meses, comprendidos entre diciembre y marzo. La evapotranspiración del cultivo alcanza los 4,68 mm/día durante el mes más crítico según los registros históricos. La reducción de la precipitación en este periodo requiere la aplicación de riego suplementario para asegurar niveles óptimos de producción.
- La textura del suelo predominante posee alta capacidad de retención de humedad, lo que facilita la implementación de riego presurizado con factor de agotamiento de 50% para reducir el riesgo de que las plantas lleguen al punto de marchitez.
- El diseño agronómico e hidráulico, permitirá irrigar una extensión de 2,72 hectáreas por turno e implementando 14 unidades de riego, con un tiempo de 11,28 horas por día y una frecuencia de 14 días para reponer un total de 65.52 mm de agua al suelo.

AGRADECIMIENTOS

Nos gustaría expresar el más sincero agradecimiento a las personas e instituciones que contribuyeron directa e indirectamente en nuestra formación profesional.

Principalmente, agradecer a la Universidad Surcolombiana y todos los docentes que compartieron con nosotros el conocimiento adquirido e infundieron el interés por la labor investigativa para contribuir al desarrollo del país.

A nuestro director de tesis, Doctor Marlio Bedoya Cardoso, quién nos inspiró el gusto por la línea de adecuación de tierras y nos brindó las bases para establecer el presente proyecto de grado.

Finalmente, estamos muy agradecidos con la empresa Unipalma de los llanos S.A. quién hizo posible realizar la investigación, a través de la base de datos suministrada y el apoyo de su personal para la obtención de parámetros fundamentales que sirvieron de pilar para encontrar los mejores resultados en el proyecto.

REFERENCIAS

- Arias-Arias, Nolver A.; Beltrán-Giraldo, Jorge. Diseño y evaluación del programa de manejo nutricional en palma de aceite: tecnologías para la agroindustria de la palma de aceite. Guía para facilitadores, 2010. <http://repositorio.fedepalma.org/handle/123456789/107625>.
- Arias-Arias, Nolver A.; Zapata-Hernández, Arley D. Balance hidroclimático en el cultivo de palma de aceite en la zona Oriental. 2019, p. 1.
- Acevedo, Edmundo; Torres, Amador. El problema de salinidad en los recursos suelo y agua que afectan el riego y cultivos en los valles de Lluta y Azapa en el norte de Chile. IDESA. 2008, v. 26, N° 3. p., 38. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292008000300004>
- Alegret-Breña, Evio; Martínez-Valdés, Yaset. Coeficiente de Hazen-Williams en función del número de Reynolds y la rugosidad relativa. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 2019, v. 40, N°3. p.41-55.
- Avila-Diazgranados, Rodrigo, A.; Daza, Edison S.; Navia, Edwin; Romero, Hernán, M. Response of various oil palm materials (*Elaeis guineensis* and *Elaeis oleifera* × *Elaeis guineensis* interspecific hybrids) to bud rot disease in the southwestern oil palm-growing area of Colombia. *Agronomía Colombiana*, (2016), v. 34(1), p. 74-81. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v34n1.53760>.
- Barrios R., Arteaga A., Florentino A., Amaya G. Evaluación de sistemas de subirrigación y de aspersión en suelos cultivados con palma aceitera. UDO Agrícola, 2003, V.3 (1), p.39-46.
- Bedoya-Cardoso, Marlio; Yossa-Manrique, Pablo C.; Yossa Osorio, Luis. Efectos de la pendiente en el coeficiente de uniformidad. IV CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE. Aguas Calientes, México: COMEII, 2018.
- Bernardo, S. Manual de irrigação. 5ª Ed. Viçosa, UFV. Imprensa Universitária. 1989. p.586.
- Bucks, D. & Nakayama, F. Emitter Clogging In Trickle Irrigation for Crop Production: Design, Operation and Management, 1986.
- CENIPALMA. Informe de labores 2017 apoyado por el fondo de fomento palmero. 2017, p.47.
- Chow, Ven Te. Handbook of applied hydrology. New York:McGraw-Hill Book, 1964.
- CONAGUA. (Comisión Nacional del Agua). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento (MAPAS). Alcantarillado Sanitario, México: Secretaría de Medio Ambiente y recursos Naturales, (2019).
- Coras-Merino, Pablo Miguel (2000) Riego por aspersión, Universidad Autónoma Chapingo, primera edición, Mexico. 209p

- Corley, R.H.V. Photosynthesis and productivity, Edit. Oil Palm research, 1982, p.55-86.
- Corley, R.H.V.; Hong, T.K. Irrigation of oil palms in Malaysia. In: (E. Pushparajah; P.S. Cnew, (Eds.)). of the International Conference on the Oil Palm in Agriculture in the Eighties. Proceedings. PORIM, Kuala Lumpur, 1981, vol.2, p.343-356.
- Farid-Ahmad, Mohammed A.; Roslan, Ahmad M.; Hassan, Mohd A.; Ujang, Farhana A.; Mohamad, Zarry; Hasan, Muhamad Y.; Shirai, Yoshihito. Convective sludge drying by rotary drum dryer using waste steam for palm oil mill effluent treatment. Journal of Cleaner Production, 2019, p.240(10),<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117986>
- FAO. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego Y Drenaje N.º 56, 1990, p. 13. ISSN 0254-5293
- FAO. Guía para la descripción de suelos. 2009, Edición 4, Capítulo 3, p. 12.
- FEDEPALMA. Producción de aceite de palma creció 2,6% a junio 2022 frente al mismo periodo 2021, 2022. <https://web.fedepalma.org/node/3802> [Consultado octubre 10 de 2022]
- Ferreira E., Raúl y Selles Van S., Gabriel.El subsolado para estimular la microporosidad y aireación del suelo [en línea]. La Cruz, Chile: Ficha Técnica INIA La Cruz. no. 21, 2016 (Consultado: 2 marzo 2023).
- Foong, S.F. Potential evapotranspiration, potential yield y leaching losses of oil palm. In: International Palm Oil Congress. Proceedings. PORIM, Kuala Lumpur, 1993, p.105-1 17.
- Fry, A. W.; Gray, A. S. Sprinkler Irrigation Handbook, 10th Edition. Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corporation, Glendora, California, 1971.
- Garzón-Correa, Diana L.; Vélez-Sánchez, Javier E.; Orduz-Rodríguez, Javier O. Efecto del déficit hídrico en el crecimiento y desarrollo de frutos de naranja Valencia (*Citrus sinensis* Osbeck) en el piedemonte del Meta, Colombia. *Acta Agronómica*, 2013, v. 62(2), p. 136-147.
- Gurovich, Luis. Riego superficial tecnificado, (2003), segunda ed. Bogotá: Alfaomega
- Hasan, Fadhil. Estado actual de la agroindustria del aceite de palma en Indonesia. Fedepalma. 2016, vol. 37 (Especial Tomo II), p. 197-202. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11936> [consultado octubre 10 de 2022].
- IGAC. Propiedades Físicas de los suelos, Bogotá, 1990, p. 813.
- Lauteri, Marco; Haworth, Matthew; Serraj, Rachid; Monteverdi, Maria C.; Centritto, Mauro. Photosynthetic diffusional constraints affect yield in drought stressed rice cultivars during flowering, 2014, PLoS ONE 9(10):e109054 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0109054>

- Leiton-Soubannier, Juan, S. Riego y Drenaje. Editorial Universidad Estatal a Distancia, San José, Costa Rica, 1985, p. 24.
- Liew, Zhen K.; Chan, Yi-Jing; Ho, Zheng T.; Yip, Yew H.; Teng, Ming C.; Ameer-Illham, Tuah-Ameer-Abbas-bin; Chong, Siewhui; Show, Pau Loke; Chew, Chien. Lye. Biogas production enhancement by co-digestion of empty fruit bunch (EFB) with palm oil mill effluent (POME): Performance and kinetic evaluation, *Renewable Energy*, 2021, v. 179, P. 766-777, ISSN 0960-1481. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.073>.
- López, Jaime. Riego en la palma de aceite en Colombia. 1991, *Revista Palmas (Colombia)* v.12, Numero Especial, p.53-56.
- Lubis, A.U ; Endang, Syamsuddin.; Kabul, Pamin. Effect of long dry season on oil palm yield at some plantations in Indonesia. In: *International Palm Oil Congress, Proceedings. PORIM*, Kuala Lumpur, 1993, p.253-262.
- Martínez-Cob, Antonio; Zapata Ruiz, Nery; Sánchez, Marcos Ignacio. Viento y riego: la variabilidad del viento en Aragón y su influencia en el riego por aspersión. *Institución Fernando el Católico*, 2010.
- Mejía, J. Consumo de agua por la palma de aceite y efectos del riego sobre la producción de racimos: una revisión de literatura. 2000, V. 21(1), p.51-58.
- Ministerio de Ambiente Y Desarrollo Sostenible. (2015, 18 de abril). Decreto 631. *Diario Oficial* No. 49.486 <https://fenavi.org/wp-content/uploads/2018/05/Resolucion-631-2015.pdf> [Consultado octubre 10 de 2022].
- Paramanathan, S. Land selection for oil palm. In: Fairhurst, T.Y., Härdter, R. (ed). *Oil palm – management for large and sustainable yields*. Potash and Phosphate Institute/Phosphate Institute of Canada; International Potash Institute. Oxford Graphic Printers Pte Ltd., 2003, p.27-57.
- Patel, Akhilesh; Sharda, Rakesh; Patel, Satish; Meena, Pramod. Reference evapotranspiration estimation using CROPWAT model at Ludhiana district (Punjab). *International Journal of Science, Environment and Technology*, 2017, v. 6(1): p. 620-629.
- Petitpierre, Geneviève. Tratamiento de efluente de palma y producción de biogas. Bogotá: Oleagineex., 1981, v. 37.
- Pizarro, Fernando. Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF) goteo, microaspersión, exudación. Edición Mundi-prensa. Madrid - Barcelona – Mexico, 1996, p. 154.
- Pratt, Parker F. Quality criteria for trace elements in irrigation waters. *California Agricultural Experiment Station*, 1972, p. 46.

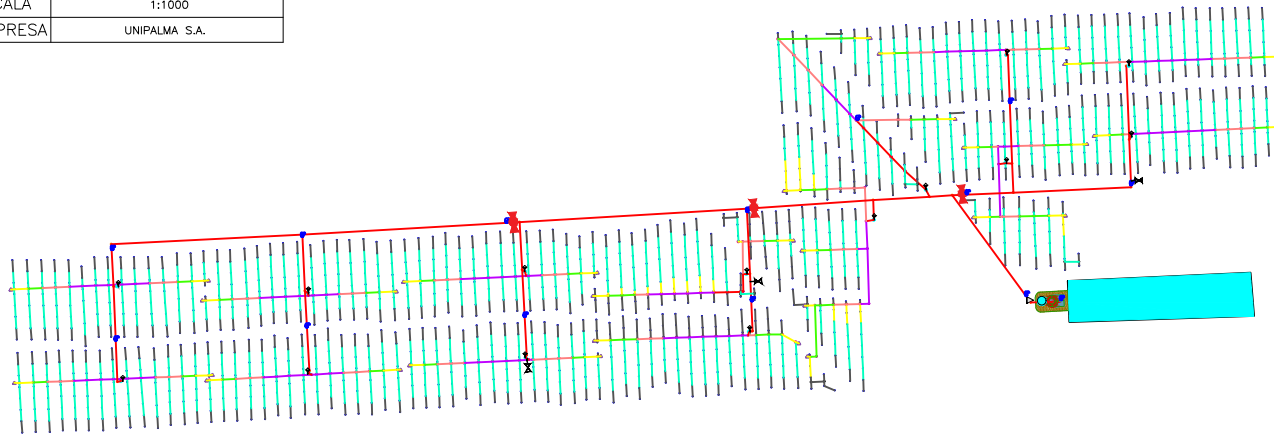
- Rivera-Mendes, Yurany D.; Cuenca, Juan C.; Romero, Hernán M. Respuestas fisiológicas de plántulas de palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) bajo diferentes condiciones de agua y suelo. 2016, v. 34, p. 414-424. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v34n2.55568>
- Sakai, Kenji; Hassan, Mohd A.; Vairappan, Charles S.; Shirai, Yoshihito. Promotion of a green economy with the palm oil industry for biodiversity conservation: A touchstone toward a sustainable bioindustry. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 2022, v. 133, p. 414-424. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2022.01.001>
- Singh, Rudra-Pratap; Embrandiri, Asha; Ibrahim, Mansor-Hamed; Esa, Norizan. Management of biomass residues generated from palm oil mill: Vermicomposting a sustainable option. *Resources, Conservation and Recycling*, 2011, v. 55(4), 423-434. P. 431. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.11.005>
- Sula-Cortés, San Pedro. Manual Técnico de Palma Africana, TechnoServe, 2009.
- Tarjuelo, José María. El riego por aspersión y su tecnología. 1999.
- Úbeda Rivera, J. S., & Delgado Dallatorre, Y. La infiltración del agua en los suelos y componentes artificiales y materia orgánica que se utilizan en ellos para la agricultura. *Rev. Iberoam. Bioecon. Cambio Clim.*, 2018, 4(7), p. 889–896. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v4i7.6299>
- Villazón-Gómez, Juan Alejandro; Noris-Noris, Pavel; Martín Gutiérrez, George. Determinación de la precipitación efectiva en áreas agropecuarias de la provincia de Holguín. *Idesia (Arica)*, 2021, v. 39(2), p. 85-90.
- Williams, Gardner Stewar; Hazen, Allan. “Hydraulic tables”, 1-8, 3rd Ed. revised, John Wiley, New York, USA. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, (1933), vol. XXIII, N° 3, ISSN 1680-0338, CIH, Cujae, La Habana, Cuba.

PROYECTO RIEGO POR ASPERSIÓN APROVECHANDO EFLUENTES – FINCA SANTA BARBARA UNIPALMA S.A

DISEÑO HIDRAULICO POR ASPERSIÓN	
DISEÑO:	CRISTIAN CAMILO MOSQUERA MOSQUERA ANDREA JULIETH PASCUAS QUINTERO
REVISÓ	MARLIO BEDOYA CARDOSO
FECHA:	21 NOVIEMBRE 2023
LUGAR:	FINCA SANTA BARBARA – CUMARAL
ESCALA	1:1000
EMPRESA	UNIPALMA S.A.

CONVENCIONES	
FUENTE DE AGUA	
VAL. HIDRAULICA 6"	
VALV. DE AIRE COMB. 1" Y 2"	
VALVULA CINETICA 3/4"	
ESTACION DE BOMBEO	
ESTACION DE FILTRADO	
REGISTRO DE CONTROL	
VALVULA CHECK	
VALVULA DE BOLA 2"	
TAPON DE LAVADO 3"	
ASPERSOR DNET 9575	

LEYENDA TUBERIAS	
TUBERIA PVC 1" RDE 21	
TUBERIA PVC 1 1/2" RDE 21	
TUBERIA PVC 2" RDE 26	
TUBERIA PVC 3" RDE 51	
TUBERIA PVC 4" RDE 51	
TUBERIA PVC 6" RDE 51	
TUBERIA PVC 8" RDE 51	



DATOS DE IRRIGACIÓN		
Descripción	Unidades	Detalles
Cultivo		PALMA
Area de Irrigation (Neta)	Has	38.09
Area Irrigation / día	Has	2.72
Espacio entre plantas	mts	9.00
Sistema de Irrigación		Aspersión
Tipo de Emisor		DNET9575
Emisor – Presión mínima	mts	20.4
Descarga del emisor	L/s	0.453
Espaciamiento entre emisores	mts	13.5
Espaciamiento entre laterales	mts	15.6
Evapotranspiración cultivo	mm/día	4.68
Lamina bruta a reponer 20%	mm	5.85
Lamina bruta por turno	mm	81.9
Ciclo de Irrigación	días	14
Tiempo de riego (turno)	Hrs	11.3
Jornada de riego disponible	Hrs	12.00
Número de turno por día		1
Tiempo total de riego/ciclo	Hrs	158.2
Caudal del sistema (turno)	L/s	52.5
Caudal disponible	L/s	//
Presión requerida Hb	mca	48.9