

Tecnologías para la agroindustria de la palma de aceite
Guía para facilitadores



Evaluación de sistemas de riego utilizados en el cultivo de palma de aceite

Tulia Esperanza Delgado Revelo
Greydy Selene Ladino Tabarquino
Nolver Atanacio Arias Arias

Tecnologías para la agroindustria de la palma de aceite
Guía para facilitadores

Evaluación de sistemas de riego utilizados
en el cultivo de palma de aceite

Tulia Esperanza Delgado Revelo
Greydy Selene Ladino Tabarquino
Nolver Atanacio Arias Arias

Bogotá, D.C., Colombia, octubre de 2021

Evaluación de sistemas de riego utilizados en el cultivo de palma de aceite

Publicación de la Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite, Cenipalma, cofinanciada por Fedepalma y el Fondo de Fomento Palmero

Autores

Tulia Esperanza Delgado Revelo
Greydy Selene Ladino Tabarquino
Nolver Atanacio Arias Arias

Coordinación editorial

Yolanda Moreno Muñoz

Fotografías

Colección de los autores

Diagramación

Fredy Johan Espitia Ballesteros

Impresión

Estudio 45-8 S.A.S.

ISBN

978-958-8360-80-5

Calle 98 No. 70-91 piso 14.
Teléfono: (57-601) 2086300
www.cenipalma.org
Bogotá, D.C. - Colombia

Octubre de 2021

Catalogación en la publicación – Biblioteca Nacional de Colombia

Delgado-Revelo, Tulia E.; Ladino-Tabarquino, Greydy S. y Arias-Arias, Nolver A.
Evaluación de sistemas de riego utilizados en el cultivo de palma de aceite / Tulia Esperanza Delgado Revelo, Greydy Selene Ladino Tabarquino y Nolver Atanacio Arias Arias. Bogotá: Cenipalma, 2020.
105 p. Colección: Tecnologías para la agroindustria de la palma de aceite - Guía para facilitadores

ISBN 978-958-8360-80-5.

1. Sistema de riego. 2. Palma de aceite (Colombia). 3. Tecnología agrícola. 4. Didáctica

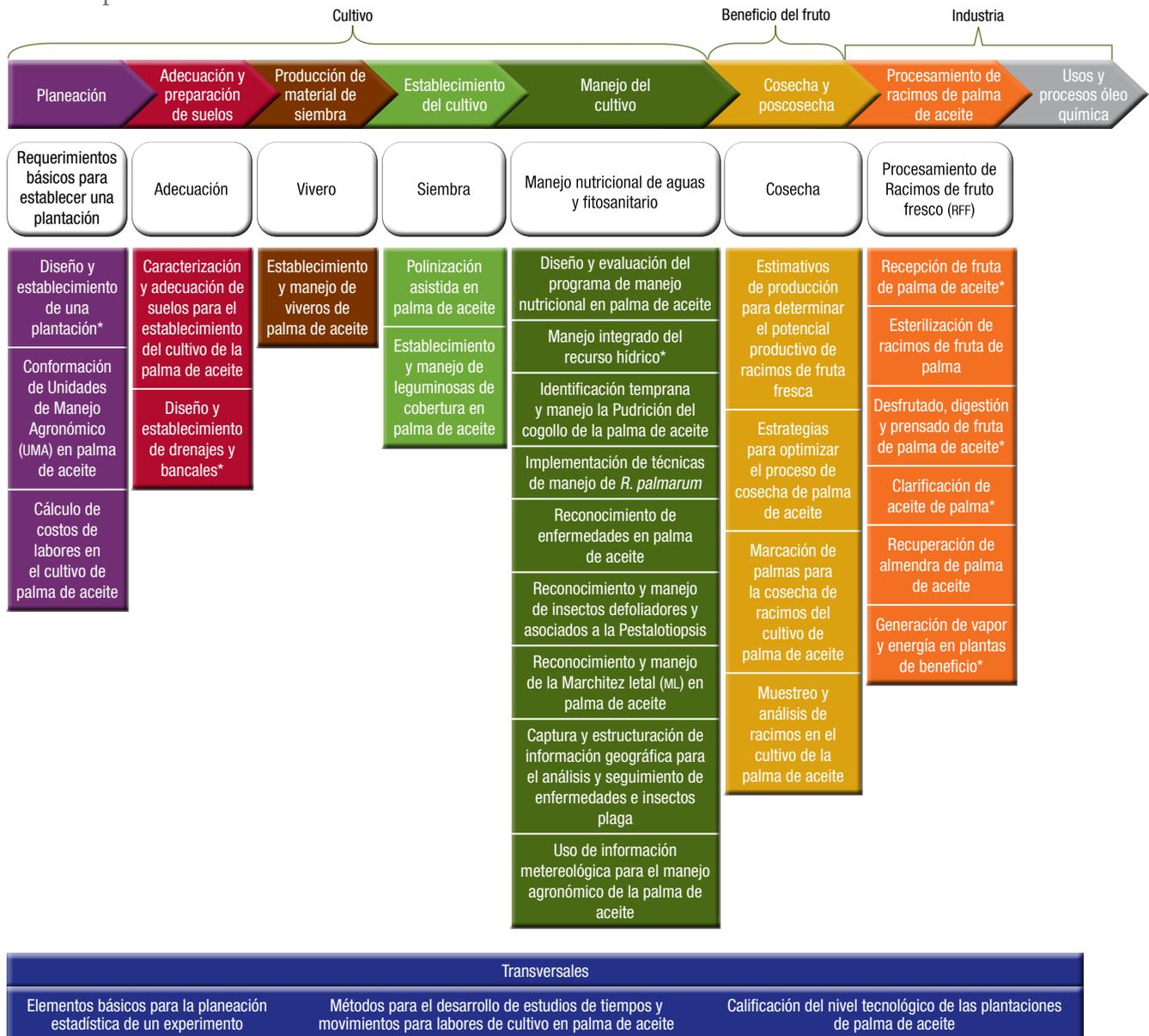
Títulos de la serie

- **Establecimiento y manejo de viveros de palma de aceite**
Dumar Flaminio Motta Valencia y Jorge Alonso Beltrán Giraldo.
- **Diseño y evaluación del programa de manejo nutricional en palma de aceite**
Nólver Atanasio Arias Arias y Jorge Alonso Beltrán Giraldo.
- **Reconocimiento de enfermedades en la palma de aceite**
Benjamín Pineda López y Gerardo Martínez López.
- **Identificación temprana y manejo de la Pudrición del cogollo de la palma de aceite**
Gabriel Andrés Torres Londoño, Greicy Andrea Sarria Villa y Gerardo Martínez López.
- **Implementación de técnicas de manejo de *Rhynchophorus palmarum***
Óscar Mauricio Moya Murillo, Rosa Cecilia Aldana de La Torre y Hamilton Gomes de Oliveira.
- **Captura y estructuración de información geográfica para el análisis y seguimiento de enfermedades e insectos plaga en las zonas palmeras de Colombia. Casos: Pudrición del cogollo (PC), *Rhynchophorus palmarum* y defoliadores**
Víctor Orlando Rincón Romero y Hernán Mauricio Romero Angulo.
- **Estimativos de producción para determinar el potencial productivo de racimos de fruta fresca**
Rodrigo Ruiz Romero, Dumar Flaminio Motta Valencia y Hernán Mauricio Romero Angulo.
- **Métodos para el desarrollo de estudios de tiempos y movimientos para labores de cultivo en palma de aceite**
Andrés Camilo Sánchez Puentes, Carlos Andrés Fontanilla Díaz y Mauricio Mosquera Montoya.
- **Esterilización de racimos de fruta de palma**
Edgar Eduardo Yáñez Angarita, Jesús Alberto García Núñez y Lina Pilar Martínez Valencia.
- **Elementos básicos para la planeación estadística de un experimento**
Eloína Mesa Fuquen.
- **Estrategias para optimizar el proceso de cosecha de palma de aceite**
Carlos Andrés Fontanilla Díaz, Andrés Camilo Sánchez Puentes y Mauricio Mosquera Montoya.
- **Polinización asistida en palma de aceite**
Ángela Sánchez Rodríguez, Édison Steve Daza, Rodrigo Ruiz Romero y Hernán Mauricio Romero Angulo.
- **Reconocimiento y manejo de insectos defoliadores y asociados a la Pestalotiopsis**
Rosa Cecilia Aldana de La Torre y Jorge Alberto Aldana de La Torre.
- **Reconocimiento y manejo integrado de la Marchitez letal (ML) en palma de aceite**
Mauricio Arango Uribe, Nubia Rairán Cortés, Gerardo Martínez López y Jorge Alonso Beltrán Giraldo.

-
- **Marcación de palmas para la cosecha de racimos del cultivo de la palma de aceite**
Carlos Andrés Fontanilla Díaz, Andrés Camilo Sánchez Puentes, Mauricio Mosquera Montoya, Wilmar Alarcón, Emiro Leal, Rafael Pertuz, Adalberto Mendez, Blanca Liliana Romero y Óscar Mario Bastidas.
 - **Muestreo y análisis de racimos en el cultivo de la palma de aceite**
Fausto Prada Chaparro y Hernán Mauricio Romero Angulo.
 - **Calificación del nivel de tecnológico de las plantaciones de palma de aceite**
Pedro Nel Franco Bautista, Nólver Atanasio Arias Arias y Jorge Alonso Beltrán Giraldo.
 - **Conformación de Unidades de Manejo Agronómico (UMA) en palma de aceite**
Diego Luis Molina López, José Álvaro Cristancho Rodríguez y Pedro Nel Franco Bautista.
 - **Uso de información meteorológica para el manejo agronómico de la palma de aceite**
Hernando Moreno Correcha, Angie Molina Villarreal y Víctor Rincón Romero.
 - **Caracterización y adecuación de suelos para el establecimiento del cultivo de la palma de aceite**
Diego Luis Molina López y Jorge Stember Torres Aguas.
 - **Establecimiento y manejo de leguminosas de cobertura en palma de aceite**
Álvaro Hernán Rincón Numpaque, Tulia Esperanza Delgado Revelo y Diego Luis Molina López.
 - **Evaluación de sistemas de riego utilizados en el cultivo de palma de aceite**
Tulia Esperanza Delgado Revelo, Greydy Selene Ladino Tabarquino y Nolver Atanacio Arias Arias.

Guías metodológicas sobre tecnologías de producción en palma de aceite

Proceso productivo



* Guías que se encuentran en proceso de realización por parte de los investigadores-autores.

La figura anterior representa el conjunto de publicaciones que abarcan todo el proceso productivo (cultivo y beneficio del fruto) de palma de aceite. Las guías fueron agrupadas de acuerdo con la fase del proceso a la que pertenecen e identificadas por colores de la siguiente manera:

Planeación (Morado): incluye las guías que abordan el tema de la planeación, además de los requerimientos básicos para establecer una plantación: “Diseño y establecimiento de una plantación en palma de aceite”, “Diseño y manejo de las Unidades de Manejo Agronómico (UMA)” y “Evaluación de costos de labores en el cultivo de la palma de aceite”.

Adecuación y preparación de suelos (Vinotinto): conforman esta fase las guías que abordan las temáticas relacionadas con el manejo integral del suelo para el establecimiento del cultivo. El proceso de manejo se inicia con el conocimiento (estudio) del estado actual del suelo y la identificación de los requerimientos que el cultivo de palma de aceite demanda con respecto a la calidad del mismo, reseñado en la guía “Caracterización del suelo para el establecimiento del cultivo de palma de aceite”. El proceso continúa con la exploración de alternativas para su adecuación, como lo propuesto en la guía “Diseño y establecimiento de bancales”, y finaliza con la planificación e implementación en el campo de la alternativa seleccionada.

Producción de materiales para siembra (Café): agrupa las guías relacionadas con la fase de preparación de los materiales para la siembra. Hasta ahora contamos con la guía “Establecimiento y manejo de viveros de palma de aceite”.

Establecimiento del cultivo (Verde claro): reúne las guías que abordan los temas para el establecimiento del cultivo, factores determinantes para su producción como: “Establecimiento y manejo de las coberturas”, así como “Aislamiento y polinización de inflorescencias”. Para esta fase también se incluyen las actividades que corresponden a las labores culturales, como limpieza de platos, interlíneas, poda y mantenimiento de la infraestructura.

Manejo del cultivo (Verde oscuro): pertenecen a esta fase las guías que abordan el manejo del cultivo desde diferentes áreas –nutricional, aguas y fitosanitario– en las que se ubican las siguientes: Detección y manejo de la Pudrición del cogollo (PC), “Reconocimiento de otras enfermedades”, “Manejo del *Rhynchophorus palmarum*”, “Reconocimiento y manejo de insectos defoliadoras y asociados a la Pestalotiopsis” y “Detección y manejo de la Marchitez letal (ML)”. También se incluyen las guías que representan herramientas de apoyo para la toma de decisiones y/o fortalecimiento del cultivo: “Sistemas de información geográfica para el análisis y seguimiento de enfermedades e insectos plaga” y “Diseño y evaluación del manejo nutricional”.

Cosecha y poscosecha (Ocre): agrupa las guías que ofrecen herramientas para optimizar, medir y estimar la producción de Racimos de fruto fresco (RFF) y/o la calidad del aceite, tales como: “Estimativos de producción”, “Estrategias para optimizar el proceso de cosecha de la palma de aceite”, “Marcación de palmas para la cosecha de palma de aceite” y “Determinación del potencial de aceite en palma mediante el análisis de racimo”.

Procesamiento de racimos de palma de aceite (Naranja): comprende las guías relacionadas con el procesamiento para la extracción del aceite de palma y sus subproductos. De acuerdo con el orden del proceso, se establecieron las siguientes: “Recepción de racimos de palma de aceite”, “Esterilización de racimos”, “Desfrutado, digestión y prensado de frutos de palma de aceite”, “Clarificación de aceite de palma”, “Recuperación de almendra de palma de aceite” y “Generación de vapor y energía en las plantas de beneficio”.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Fondo de Fomento Palmero, administrado por Fedepalma, por la financiación de las actividades de investigación que permitieron la producción de este documento, y a las plantaciones de la Zona Norte por permitir las evaluaciones de los diferentes sistemas de riego utilizados en el cultivo de palma de aceite, por su colaboración y aportes en la elaboración y validación de esta guía.

Contenido



Listado de acrónimos.....	13
Listado de abreviaturas	14
Presentación	15
Introducción	17
Modelo de aprendizaje	19
Usos y adaptaciones.....	19
Retroalimentación inicial de conocimientos	24
Exploración de expectativas	28
Objetivos y estructura de aprendizaje	29
Objetivos de aprendizaje.....	29
Estructura de aprendizaje	30
Explicación de la estructura	30
Unidad de aprendizaje 1. Fundamentos para el manejo del recurso hídrico en el cultivo de palma de aceite.....	31
Estructura de aprendizaje de la unidad	33
Explicación de la estructura	33
Preguntas orientadoras	34
Objetivos.....	34
Introducción	34
1.1 Sistema de unidades de medida	34
1.2 Conceptos básicos de topografía.....	37
1.3 Principios y conceptos básicos	38
Práctica 1. Determinación de humedad del suelo (CC, PMP y curvas de retención de humedad).....	51
Ejercicio 1. Cálculo de parámetros para la programación del riego en el cultivo de palma: LARA, tiempo y frecuencia de riego	52

Ejercicio 2. Caso ejemplo	53
Bibliografía.....	55
Unidad de aprendizaje 2. Descripción de los sistemas de riego utilizados en el cultivo de palma	59
Estructura de aprendizaje de la unidad	61
Explicación de la estructura	61
Preguntas orientadoras	61
Objetivos.....	61
Introducción	62
2.1 Sistemas de riego	62
Ejercicio 3. Seleccionemos el sistema de riego más apropiado, considerando las condiciones de clima, suelo, cultivo y costos	68
Bibliografía.....	69
Unidad de aprendizaje 3. Descripción de los métodos de evaluación de la eficiencia de los sistemas de riego por superficie y presurizados.....	71
Estructura de aprendizaje de la unidad	73
Explicación de la estructura	73
Preguntas orientadoras	73
Objetivos.....	73
Introducción	74
3.1 Eficiencias del sistema de riego	74
3.2 Medición del caudal (aforos)	74
3.3 Eficiencia de conducción	79
3.4 Eficiencia de distribución	79
Práctica 2. Determinemos la eficiencia de conducción en un canal de riego	80
3.5 Eficiencia de aplicación	83
Práctica 3. Determinemos el desempeño de un sistema de riego por surcos.....	86
Ejercicio 4. Problema tomado de la FAO (Walker, 1989)	89

Práctica 4. Determinemos la eficiencia de uniformidad de un sistema de riego por aspersión.....	93
Bibliografía.....	96
Anexo 1. Material de apoyo aforo en canales abiertos por el método del flotador.....	97
Anexo 2. Material de apoyo para la evaluación de desempeño del sistema de riego por surcos.....	99
Anexo 3. Material de apoyo para la evaluación de la eficiencia de uniformidad de un sistema de riego por aspersión.....	103

Listado de acrónimos

Cenipalma:	Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite
Fedepalma:	Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite
CENAM:	Centro Nacional de Metrología
IGAC:	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
FAO:	Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura)
USDA:	The United States Department of Agriculture (Departamento de Agricultura de Estados Unidos)
INTA:	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de Argentina
CVC:	Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca
ISO:	Organización Internacional de Normalización

Listado de abreviaturas

ARA:	Agua rápidamente aprovechable (%)	Ma:	Masa de aire (g)
CO₂:	Dióxido de carbono	Mp:	Masa de sistema poroso (g)
CC:	Humedad a capacidad de campo (expresada en % o en mm)	Ms:	Masa de suelo seco (g)
Es:	Escorrentía (mm)	Mt:	Masa total del suelo (g)
ETc:	Evapotranspiración del cultivo (mm/día)	Mw:	Masa del agua (g)
ETo:	Evapotranspiración de referencia (mm/día)	NH:	Nivel crítico de humedad del suelo
ESR:	Eficiencia de un sistema de riego (%)	PMP:	Humedad a punto de marchitez (expresada en % o en mm)
EC:	Eficiencia de conducción (%)	Pc:	Percolación profunda (mm)
ED:	Eficiencia de distribución (%)	Tr:	Tiempo de riego (horas)
EA:	Eficiencia de aplicación de un método de riego (%)	Va:	Volumen de aire (cm ³)
Da:	Densidad aparente del suelo (g/cm ³)	Vp:	Volumen de sistema poroso (cm ³)
fa:	Factor de agotamiento (%)	Vs:	Volumen de suelo (cm ³)
Fr:	Frecuencia de riego (días)	Vt:	Volumen total de suelo (cm ³)
Ib:	Infiltración básica (mm/h)	Vw:	Volumen de agua (cm ³)
Kc:	Coefficiente del cultivo	VZR:	Volumen de agua en la zona de raíces (m ³ o litros)
Lam:	Lámina de agua en el suelo (mm)	W:	Agua almacenada en el suelo con base en masa (%)
LARA:	Lámina de agua rápidamente aprovechable (mm)	θ:	Agua almacenada en el suelo con base en volumen (%)
LZR:	Lámina de agua en la zona de raíces (mm)		

Presentación

La implementación de las guías metodológicas como herramientas de apoyo a la transferencia y la extensión han contribuido satisfactoriamente a la adopción de diferentes tecnologías desarrolladas por Cenipalma. Por tal razón, se continuó con la elaboración y publicación de nuevas guías para cubrir cada una de las fases y/o componentes de la cadena productiva, así como para atender la demanda de soluciones tecnológicas en las fases de establecimiento y desarrollo del cultivo, manejo nutricional y fitosanitario, producción y extracción de aceite.

Continuar con el trabajo colaborativo entre la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite, Fedepalma, y la Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite, Cenipalma, representa la firme convicción y certeza del gran aporte de este esfuerzo conjunto para el mejoramiento de la producción de los aceites y derivados que surgen de este importante cultivo en el país.

Con base en las lecciones aprendidas, un segundo grupo de investigadores de Cenipalma ha adoptado y mejorado un modelo para compartir experiencias y conocimientos sobre temas claves que cubren los procesos productivos de plantación, planta de beneficio y demás aspectos de interés en poscosecha y comercialización. Estos materiales constituyen el corazón de un currículo básico sobre el manejo del cultivo que son de gran utilidad en el proceso de actualización de los palmicultores y técnicos que laboran en las empresas palmeras, así como en la formación de facilitadores, técnicos y profesionales en los niveles medio y superior.

Las guías, dirigidas a facilitadores en diferentes ámbitos de la transferencia tecnológica y de la formación, han sido diseñadas siguiendo una metodología centrada en el desarrollo de las competencias que requieren los propietarios de las plantaciones, técnicos y trabajadores de campo y plantas de beneficio, para responder en forma oportuna a los retos que plantea la agroindustria de la palma de aceite.

La estructura didáctica de las guías orienta a los facilitadores hacia el desarrollo de una capacitación centrada en el adelanto de las capacidades requeridas para el manejo de cada una de las tecnologías. La inclusión de elementos didácticos, como las estructuras de aprendizaje, las preguntas orientadoras y una variedad de ejercicios y prácticas de campo diseñadas en detalle, además de una serie de anexos didácticos y técnicos, permiten que el usuario de las guías tenga una plataforma metodológica bastante elaborada, que no excluye las innovaciones creativas por parte de quienes dirijan la transferencia o la capacitación.

Cenipalma presenta, con particular orgullo, a la comunidad palmera esta segunda serie de materiales didácticos y a todos aquellos técnicos, profesionales y docentes interesados en actualizar conocimientos para la formación de los futuros responsables del escalamiento de este cultivo tan promisorio en la economía nacional.

Quiero expresar un sincero agradecimiento al ingeniero Jorge Alonso Beltrán Giraldo, quien tomó sobre sus hombros la responsabilidad de coordinar la producción de las guías, desde la definición de los temas más relevantes sobre los cuales trabajar, hasta la publicación, pasando por su revisión y validación en campo. Igualmente, un inmenso agradecimiento al Dr. Vicente Zapata Sánchez, quien nuevamente participó y aportó su amplia experiencia mediante el acompañamiento personalizado a cada uno de los investigadores para que realizaran las guías con un enfoque didáctico dirigido a la apropiación del conocimiento. Finalmente, mi gratitud a los investigadores que invirtieron incontables horas de reflexión y elaboración creativa para la conformación final de productos que contribuyen a la construcción del capital intelectual del gremio y nos llenan de orgullo institucional.

ALEXANDRE PATRICK COOMAN, *Ph.D.*

Director General

Cenipalma

Introducción

Recursos como el suelo y el agua son necesarios para la producción agropecuaria. Infortunadamente no se distribuyen de una manera óptima y quedan limitados severamente por las condiciones climáticas. Con respecto al agua, en la actualidad está presentando tendencia a su degradación y escasez a nivel mundial, debido a la explosión demográfica de las últimas décadas, la sobreexplotación por la gran demanda de sus volúmenes para la agricultura, y por la variabilidad climática. En Colombia se han presentado disminuciones significativas en las precipitaciones en algunas regiones del país, entre ellas la zona del Caribe hasta en un 40 % (IDEAM, 2015; IDEAM 2019), limitando aún más la disponibilidad de agua para los cultivos en dicha región.

En consecuencia, garantizar el suministro adecuado de agua para el manejo de los cultivos se convierte en un factor importante, y requiere el desarrollo de tecnologías que incrementen su uso eficiente. En el caso del cultivo de la palma de aceite en Colombia, en mayor grado en las zonas Oriental y Norte, se necesita regar para suplir los requerimientos que no alcanzan a cubrir las lluvias. En la Oriental, normalmente ocurre un periodo seco entre diciembre y marzo, y se acostumbra a regar por gravedad. En la Norte, se dan entre cinco y seis meses secos, y la palma se riega por gravedad, microaspersión y en algunos casos por goteo. Una de las mayores limitantes en esta zona corresponde a la precipitación, pues no es suficiente para satisfacer la demanda del cultivo, siendo preciso aplicar riegos suplementarios. Esta situación se ha venido empeorando en los últimos años, dado que la disponibilidad del agua es cada vez más limitada. Según el IDEAM (2019) se han presentado cambios en la cantidad, calidad y distribución geográfica y estacional del recurso hídrico, y solo el 31 % de la precipitación media anual está disponible para fines productivos. Por lo tanto, es apremiante la necesidad de mejorar la eficiencia de los sistemas de riego utilizados para el cultivo, a fin de garantizar su sostenibilidad y enfrentar las incertidumbres asociadas con el cambio climático.

Se requiere de la implementación y manejo de sistemas de riego y drenaje apropiados. La realidad es que muchos de estos han sido instalados sin un adecuado diseño, y no son operados correctamente. Es fundamental evaluar su desempeño para poder determinar estrategias de operación más económicas y eficientes, que signifiquen no solo un ahorro en el uso del agua, sino también en la mano de obra y energía utilizada.

Esta guía está dirigida al personal técnico involucrado con el manejo agronómico del cultivo, y tiene por objetivo facilitar herramientas y metodologías para la evaluación del desempeño de los diferentes sistemas de riego utilizados. Para lograrlo, se han diseñado tres unidades de aprendizaje que parten de un conocimiento básico, afianzado mediante ejercicios y prácticas, que permitirán a los facilitadores y participantes de las capacitaciones, tener conceptos y criterios útiles. Se abordan diferentes temas sobre la relación suelo-agua-planta-atmósfera, y su importancia para el adecuado funcionamiento de un sistema de riego. La segunda unidad contribuye al conocimiento de los componentes de los diferentes métodos de riego y de los criterios para su instalación. Y la tercera está enfocada en las metodologías para determinar la eficiencia de los sistemas de riego más empleados en el cultivo de la palma de aceite.

Modelo de aprendizaje



Usos y adaptaciones

Exploración inicial de conocimientos

La exploración del conocimiento de forma inicial proporciona al facilitador una visión amplia de la comprensión de los temas a exponer al grupo que está capacitando.

Esto puede hacerse mediante un cuestionario sencillo sobre la materia, que relacione aspectos de la vida cotidiana con el tema a tratar. Puede ser elaborado con anterioridad, y suministrado en físico a cada participante, anunciando su entrega al terminar o en plenaria abierta, donde el facilitador realizará la retroalimentación y dará explicación, aprobación o respuesta a las preguntas inconclusas o consultas realizadas por los asistentes.

Orientaciones para el facilitador

Antes de empezar con la capacitación, se recomienda al facilitador hacer su presentación personal y la de los miembros del grupo. De esta manera se permitirá

que los participantes conozcan a los compañeros con quienes van a compartir el aprendizaje.

A continuación, el facilitador de esta guía les pedirá responder las preguntas que aparecen en el siguiente cuestionario. Se recomienda aclarar previamente que la actividad no se trata de una evaluación, sino de un instrumento que les ayudará a abordar la temática identificando los aspectos que desean profundizar.

Preguntas

- De las siguientes opciones seleccione con una X qué parámetros se deben conocer para realizar una adecuada planificación del riego.
 - Viento- humedad relativa- horas de sol- temperatura-planta.
 - Lluvia- suelo- planta.
 - Evaporación- lluvia- planta- humedad del suelo.
 - Agua- suelo- planta- atmósfera.
 - Edad del cultivo- textura y humedad del suelo.

2. En la siguiente tabla señale con una X aquellas que considere NO son propiedades hidrodinámicas del suelo.

pH	Color	Salinidad
Actividad microbiana	Textura	Densidad aparente
Distribución radicular	Consistencia	Materia orgánica
Retención de humedad	Perfil (horizontes)	Compactación
Conductividad eléctrica	Acidez	Fertilidad
Estructura	Infiltración	Porosidad

3. De acuerdo con su conocimiento, relacione con una línea cada propiedad hidrodinámica del suelo con su método de determinación en campo.

Propiedad	Método
Densidad aparente	Anillos concéntricos de Muntz
Textura	Cilindro metálico
Retención de humedad	Gravimétrico
Infiltración	Tacto
Estructura	Ollas de presión de Richards
Humedad del suelo	Hidrómetro de Bouyoucus

4. ¿Por qué es importante conocer las características hidrodinámicas de un suelo? De las siguientes opciones, seleccione las que son correctas.

- Porque permite conocer la fertilidad del suelo.
- Porque permite establecer la humedad aprovechable del suelo.
- Porque permite determinar las necesidades hídricas y nutricionales del cultivo de palma de aceite.
- Porque es indispensable para la programación de riego y drenaje en los cultivos.
- Porque garantiza un uso eficiente del agua.

5. ¿Conoce la relación de las propiedades del suelo con la dinámica del agua en el suelo, indicadas en la tabla? Responda Sí o No, y en caso afirmativo relacione mediante una línea las frases del cuadro.

a. Sí

b. No

Densidad aparente		Permite conocer el volumen de agua que puede ser almacenado en forma disponible para el cultivo.
Infiltración		Refleja la compactación, facilidad de circulación de agua y aire, y la de penetración de las raíces y de los animales.
Estructura		Es el porcentaje del volumen del suelo no ocupado por sólidos, y puede condicionar el almacenamiento, aireación y drenaje del suelo.
Retención de humedad		Proceso a través del cual el agua ingresa al suelo por la superficie, hacia sus capas inferiores, vertical y horizontalmente.
Textura		Forma en que se agrupan las partículas individuales de arena, limo y arcilla. La conformación de estas produce un efecto importante sobre la permeabilidad, aireación y retención de humedad en el suelo.
Porosidad		Contenido relativo de partículas: arenas, limos y arcillas en el suelo. Esta propiedad tiene que ver con la facilidad con que se puede trabajar el suelo, la cantidad de agua y aire retenido, y la velocidad de infiltración.

6. ¿Es posible calcular el agua almacenada en el suelo posterior a un evento de precipitación o riego? En caso afirmativo responda qué método conoce.

a. Verdadero. _____

b. Falso.

7. Seleccione con una X cuáles de los siguientes parámetros se deben tener en cuenta al momento de programar el riego.

a. Presión	b. Agua aprovechable del suelo	c. Evaporación
d. Velocidad del agua	e. Hora del día	f. Caudal
g. Transpiración	h. Tamaño de la gota	i. Calidad del agua
j. Etapa vegetativa de la palma	k. Fertilización	l. Precipitación previa
m. Escorrentía	n. Topografía	o. Percolación
p. Altura de la palma	q. Humedad relativa	r. Temperatura
s. Aporte capilar	t. Registro de aforos	u. Humedad del suelo

-
8. Señale con una X las entradas y salidas de agua en un cultivo de palma.
- Fotosíntesis, evapotranspiración.
 - Precipitación, riego, aporte capilar.
 - Evaporación, transpiración.
 - a y c son correctas.
 - b y c son correctas.
9. ¿Qué es un sistema de riego y para qué sirve? Seleccione con una X la opción correcta.
- Es un procedimiento que provee de agua a los cultivos de manera automatizada.
 - Es el conjunto de estructuras que hace posible que una determinada área pueda ser cultivada con la aplicación del agua disponible en la bocatoma.
 - Es el grupo de canales y estructuras que permite conducir el agua desde la captación hasta el lote.
 - Es el conjunto de tecnologías que posibilita el aporte y la aplicación del agua requerida a los cultivos, desde la fuente hasta el lote.
 - Es un procedimiento que consiste en el aporte natural de agua a un determinado terreno, de manera uniforme sobre el campo.
10. A continuación, conecte mediante una línea el método con el sistema de riego al que corresponde.

Método		Sistema de riego
Surcos		Superficial
Aspersión		
Riego en contornos		
Pivote central		
Surcos anchos		
Tapones		Presurizado
Inundación		
Goteo		
Melgas		

11. De las siguientes opciones clasifique con una P y/o S los componentes que pertenecen a un sistema de riego presurizado y superficial, respectivamente.

Cabezal de campo	Surcos	Río
Gotos	Laterales	Pozos de observación
Estación de bombeo	Tubería	Canales
Aspersores	Filtros	Emisores
Reservorio	Pozo	Válvulas

12. Señale la opción para calcular el caudal (Q).

- $Q = \text{espacio recorrido} / \text{tiempo}$.
- $Q = \text{área} / \text{tiempo}$.
- $Q = \text{volumen} / \text{tiempo}$.
- $Q = \text{velocidad} * \text{área}$.
- c y d son correctas.

13. ¿Qué es un aforo? Seleccione la respuesta correcta.

- Es la técnica que permite cuantificar el caudal con el fin de llevar un registro del agua captada, almacenada, transportada, perdida, aplicada, etc.
- Es la técnica que ayuda a cuantificar el volumen de agua almacenado en un reservorio.
- Es el procedimiento para determinar la calidad de agua.
- Es la técnica que permite conocer el estado actual de los pozos para programar mantenimientos.
- Es la técnica para medir la profundidad del agua en un río o embalse.

14. ¿Qué es un sistema de riego eficiente? Señale la definición correcta.

- Es aquel que aplica el agua de manera uniforme sobre el campo, como es el caso de aspersión.
- Es el método de riego que suministra de forma localizada y paulatina el agua a los cultivos, permitiendo una mejor absorción.
- Es el que aporta el agua que necesita el cultivo en el momento del riego, presentando las menores pérdidas desde la captación hasta su aplicación.
- Es aquel que presenta mayor número de tuberías y accesorios tecnificados, garantizando una reducción de las pérdidas.
- Es el que consume el menor volumen de agua, energía, etc., siendo operacionalmente más económico.

Retroalimentación inicial de conocimientos

Instrucciones para los participantes

Como introducción a esta unidad se realizará un cuestionario relacionado con la materia a tratar en la unidad de aprendizaje. No es un examen, es una oportunidad para sondear sus conocimientos, y poderle sacar el mejor provecho al tema a aprender.

El facilitador compartirá en grupo las respuestas del cuestionario, comparándolas con las de cada participante, creando inquietudes sobre el tema o recordando conocimientos ya aprendidos. De esta manera se despertará el interés sobre el curso y se generarán

nuevas expectativas sobre los temas a aprender en las siguientes unidades.

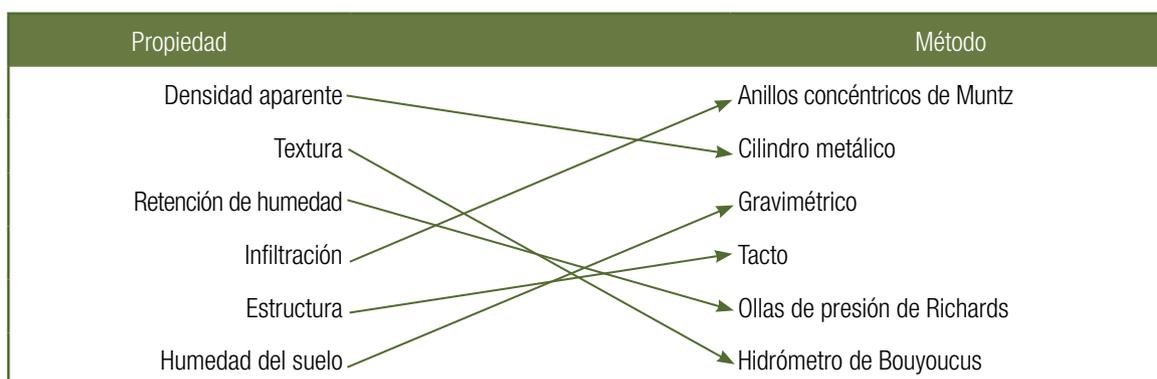
Respuestas

- De las siguientes opciones seleccione con una X qué parámetros se deben conocer para realizar una adecuada planificación del riego.
 - Viento- humedad relativa- horas de sol- temperatura-planta.
 - Lluvia- suelo- planta.
 - Evaporación- lluvia- planta- humedad del suelo.
 - Agua- suelo- planta- atmósfera.
 - Edad del cultivo- textura y humedad del suelo.
- En la siguiente tabla señale con una X aquellas que considere NO son propiedades hidrodinámicas del suelo.

<input checked="" type="checkbox"/> pH	<input checked="" type="checkbox"/> Color	<input checked="" type="checkbox"/> Salinidad
<input checked="" type="checkbox"/> Actividad microbiana	Textura	Densidad aparente
<input checked="" type="checkbox"/> Distribución radicular	<input checked="" type="checkbox"/> Consistencia	<input checked="" type="checkbox"/> Materia orgánica
Retención de humedad	<input checked="" type="checkbox"/> Perfil (horizontes)	<input checked="" type="checkbox"/> Compactación
<input checked="" type="checkbox"/> Conductividad eléctrica	<input checked="" type="checkbox"/> Acidez	<input checked="" type="checkbox"/> Fertilidad
Estructura	Infiltración	Porosidad

- De acuerdo con su conocimiento, relacione cada propiedad hidrodinámica del suelo con su método de determinación en campo.

La relación es la siguiente:



4. ¿Por qué es importante conocer las características hidrodinámicas de un suelo? De las siguientes opciones, seleccione las que son correctas.
- a. Porque ayuda a conocer la fertilidad del suelo.
 - b. Porque permite establecer la humedad aprovechable del suelo.
 - c. Porque facilita determinar las necesidades hídricas y nutricionales del cultivo de palma de aceite.
 - d. Porque es indispensable para la programación de riego y drenaje en los cultivos.
 - e. Porque garantiza un uso eficiente del agua.
5. ¿Conoce la relación de las propiedades del suelo con la dinámica del agua en el suelo, indicadas en la tabla? Responda Sí o No, y en caso afirmativo relacione mediante una línea las frases del cuadro.

Densidad aparente		Permite conocer el volumen de agua que puede ser almacenado en forma disponible para el cultivo.
Infiltración		Refleja la compactación, facilidad de circulación de agua y aire, y la de penetración de las raíces y de los animales.
Estructura		Es el porcentaje del volumen del suelo no ocupado por sólidos, y puede condicionar el almacenamiento, aireación y drenaje del suelo.
Retención de humedad		Proceso a través del cual el agua ingresa al suelo por la superficie, hacia sus capas inferiores, vertical y horizontalmente.
Textura		Forma en que se agrupan las partículas individuales de arena, limo y arcilla. La conformación de estas produce un efecto importante sobre la permeabilidad, aireación y retención de humedad en el suelo.
Porosidad		Contenido relativo de partículas: arenas, limos y arcillas en el suelo. Esta propiedad tiene que ver con la facilidad con que se puede trabajar el suelo, la cantidad de agua y aire retenido, y la velocidad de infiltración.

6. ¿Es posible calcular el agua almacenada en el suelo posterior a un evento de precipitación o riego? En caso afirmativo responda que método conoce.
- a. **Verdadero.** Si es posible mediante sensores o realizando la determinación por el método gravimétrico que consiste en extraer una muestra de suelo en campo.

7. Seleccione con una X cuáles de los siguientes parámetros se deben tener en cuenta al momento de programar el riego.

Los principales parámetros son:

a. Presión	<input checked="" type="checkbox"/> Agua aprovechable del suelo	<input checked="" type="checkbox"/> Evaporación
d. Velocidad del agua	e. Hora del día	f. Caudal
<input checked="" type="checkbox"/> Transpiración	h. Tamaño de la gota	i. Calidad del agua
<input checked="" type="checkbox"/> Etapa vegetativa de la palma	k. Fertilización	<input checked="" type="checkbox"/> Precipitación previa
m. Escorrentía	n. Topografía	o. Percolación
p. Altura de la palma	q. Humedad relativa	r. Temperatura
<input checked="" type="checkbox"/> Aporte capilar	t. Registro de aforos	<input checked="" type="checkbox"/> Humedad del suelo

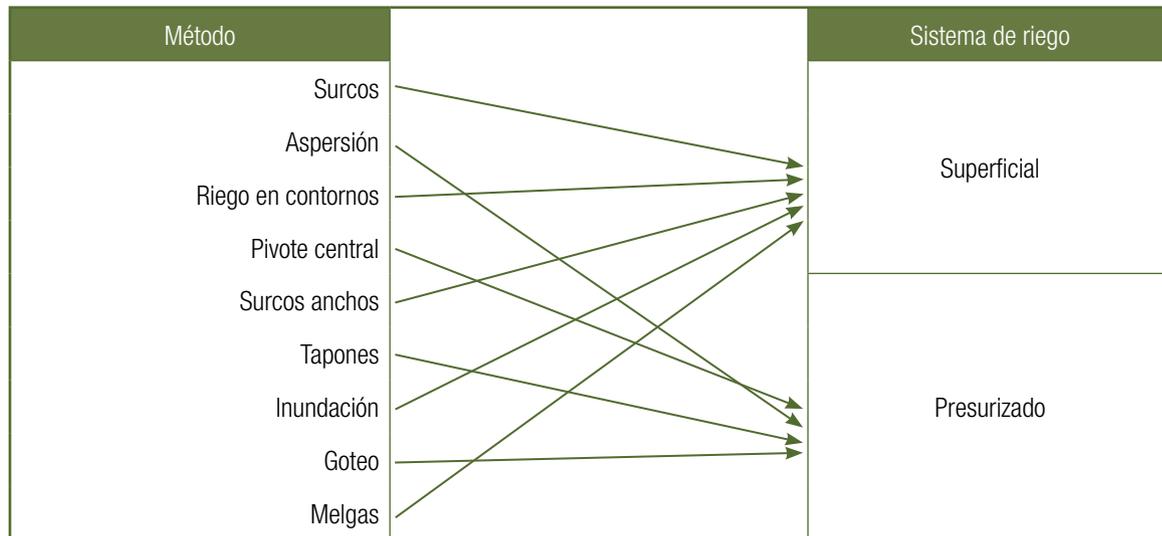
8. Señale con una X las entradas y salidas de agua en un cultivo de palma.

- a. Fotosíntesis, evapotranspiración.
- b. Precipitación, riego, aporte capilar.
- c. Evaporación, transpiración.
- d. a y c son correctas.
- b y c son correctas.

9. ¿Qué es un sistema de riego y para qué sirve? Seleccione con una X la opción correcta.

- a. Es un procedimiento que provee de agua a los cultivos de manera automatizada.
- b. Es el conjunto de estructuras que hace posible que una determinada área pueda ser cultivada con la aplicación del agua disponible en la bocatoma.
- c. Es el grupo de canales y estructuras que permite conducir el agua desde la captación hasta el lote.
- Es el conjunto de tecnologías que posibilita el aporte y la aplicación del agua requerida a los cultivos, desde la fuente hasta el lote.
- e. Es un procedimiento que consiste en el aporte natural de agua a un determinado terreno, de manera uniforme sobre el campo.

10. A continuación, conecte mediante una línea el método con el sistema de riego al que corresponde



11. De las siguientes opciones clasifique con una P y/o S los componentes que pertenecen a un sistema de riego presurizado y superficial, respectivamente.

Cabezal de campo (P)	Surcos (S)	Río (P) Y (S)
Goteros (P)	Laterales (P)	Pozos de observación
Estación de bombeo (P) Y (S)	Tubería (P)	Canales (S)
Aspersores (P)	Filtros (P)	Emisores (P)
Reservorio (P) Y (S)	Pozo (P) Y (S)	Válvulas (P)

12. Señale la opción para calcular el caudal (Q).

- $Q = \text{espacio recorrido} / \text{tiempo}$.
- $Q = \text{área} / \text{tiempo}$.
- $Q = \text{volumen} / \text{tiempo}$.
- $Q = \text{velocidad} * \text{área}$.

c y d son correctas.

13. ¿Qué es un aforo? Seleccione la respuesta correcta.

- ✗ Es la técnica que permite cuantificar el caudal con el fin de llevar un registro del agua captada, almacenada, transportada, perdida, aplicada, etc.
- b. Es la técnica que ayuda a cuantificar el volumen de agua almacenado en un reservorio.
- c. Es el procedimiento para determinar la calidad de agua.
- d. Es la técnica que permite conocer el estado actual de los pozos para programar mantenimientos.
- e. Es la técnica para medir la profundidad del agua en un río o embalse.

14. ¿Qué es un sistema de riego eficiente? Señale la definición correcta.

- a. Es aquel que aplica el agua de manera uniforme sobre el campo, como es el caso de aspersión.
- b. Es el método de riego que suministra de forma localizada y paulatina el agua a los cultivos, permitiendo una mejor absorción.

✗ Es el que aporta el agua que necesita el cultivo en el momento del riego, presentando las menores pérdidas desde la captación hasta su aplicación.

- d. Es aquel que presenta mayor número de tuberías y accesorios tecnificados, garantizando una reducción de las pérdidas.
- e. Es el que consume el menor volumen de agua, energía, etc., siendo operacionalmente más económico.

Exploración de expectativas

Orientación para el facilitador

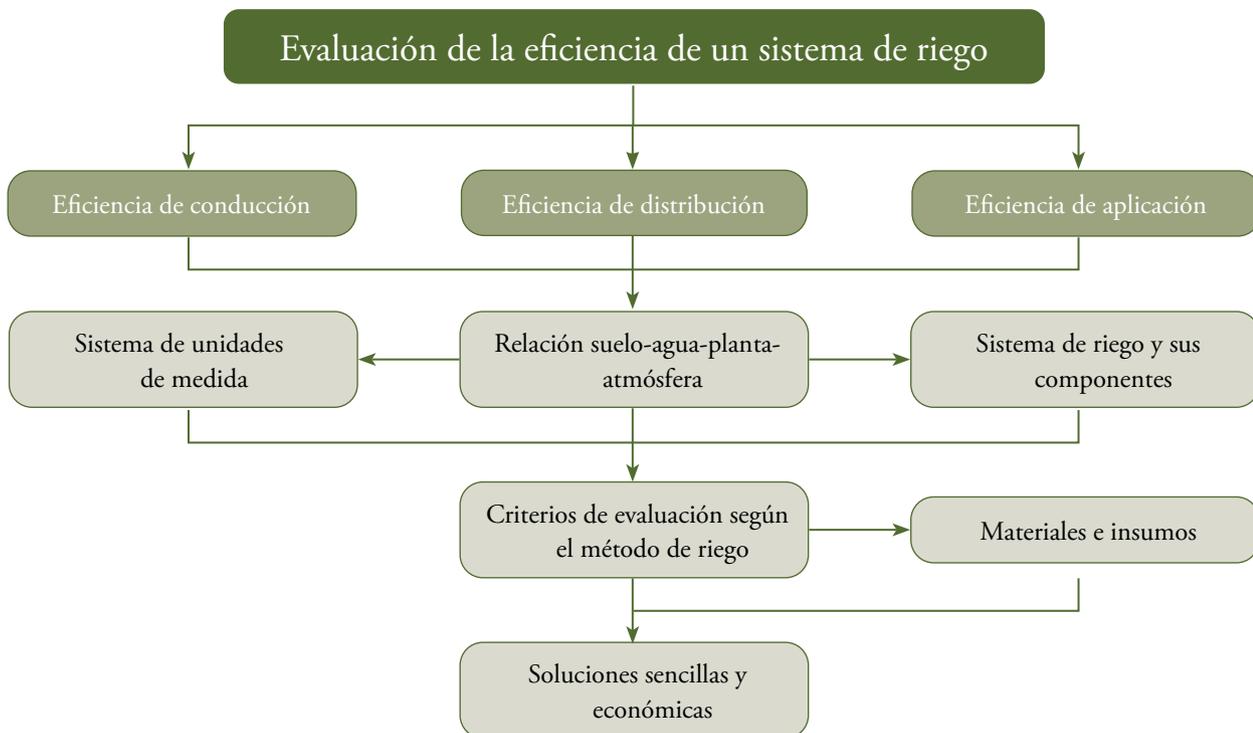
Es importante conocer las expectativas del grupo respecto al curso, ya que permite definir el derrotero de la temática. Por lo tanto, el facilitador tiene la oportunidad de generar una discusión con los participantes sobre sus inquietudes alrededor del tema por tratar. Si dentro del listado que exprese el grupo se encuentra algo que no se desarrollará, el facilitador debe darlo a conocer. Para esta actividad se tiene establecido un tiempo máximo de 30 minutos.

Objetivos y estructura de aprendizaje

Objetivos de aprendizaje

Al finalizar el estudio de esta guía se estará en capacidad de:

- Reconocer los sistemas de unidades de medida más utilizados para la evaluación del desempeño de los sistemas de riego por superficie y presurizados.
- Identificar y determinar en campo las principales propiedades hidrodinámicas del suelo, que influyen en la eficiencia de los diferentes sistemas de riego establecidos en el cultivo de palma de aceite.
- Describir la metodología, los instrumentos e insumos que se deben tener en cuenta para la evaluación de la eficiencia de los diferentes sistemas de riego, resaltando la importancia de la planeación en el éxito de la labor.
- Conocer, comprender y aplicar los procedimientos, para establecer la efectividad de los diferentes sistemas de riego por superficie (inundación, melgas y surcos anchos) y presurizados (goteo de alto caudal y aspersion).
- Determinar los problemas de funcionamiento de los diferentes sistemas de riego, para plantear soluciones sencillas y económicas a las deficiencias encontradas.



Estructura de aprendizaje

Esta guía comprende temas relacionados con la evaluación del desempeño de los diferentes sistemas de riego utilizados en el cultivo de palma de aceite, buscando generar interés en la actividad mediante el conocimiento de criterios para su adecuada implementación y ejecución. A continuación, se presenta la estructura de aprendizaje propuesta.

Explicación de la estructura

La estructura de aprendizaje planteada comprende tres grandes temas: la evaluación de la eficiencia de (1) conducción, (2) distribución y (3) aplicación, para los diferentes métodos de riego usados en el cultivo de palma de aceite.

Para determinar estas eficiencias, se tiene como punto de partida los conocimientos básicos de los sistemas de unidades de medida, la relación suelo-agua-planta y atmósfera como fundamento para el diseño de sistemas de riego, los diferentes componentes que lo conforman, los materiales e insumos con los que se debe contar para el desarrollo de las valoraciones en campo, y los criterios de la evaluación según cada método de riego. Todo lo anterior permitirá que se apliquen los procedimientos adecuados para estimar el desempeño de algunos sistemas de riego, y de esta manera se identifique si la cantidad de agua usada es la que requiere el cultivo con un mínimo de pérdidas.

Para abordar estos temas, la guía se divide en tres unidades de aprendizaje que se describen a continuación.

Unidad de aprendizaje 1

Se explican los fundamentos para el manejo del agua en el cultivo de palma. En primer lugar, se describen los sistemas de unidades de medida que se utilizan en las evaluaciones de los métodos de riego. Luego están los conceptos básicos de topografía, georreferenciación y la relación agua-suelo-planta-atmósfera, que permiten determinar parámetros tales como lámina, tiempo y frecuencia, claves para la evaluación de los sistemas de riego.

Unidad de aprendizaje 2

Se describen los componentes y las características de los diferentes sistemas de riego: por superficie (inundación, melgas y surcos anchos) y presurizados (goteo de alto caudal, aspersión y tapones).

Unidad de aprendizaje 3

Se explican las diferentes metodologías para la evaluación de la eficiencia de conducción, distribución y aplicación para los principales sistemas de riego utilizados en el cultivo de palma de aceite: por inundación, surcos anchos, goteo de alto caudal y aspersión. En cada uno se exponen los materiales e insumos necesarios para realizar las mediciones en campo.



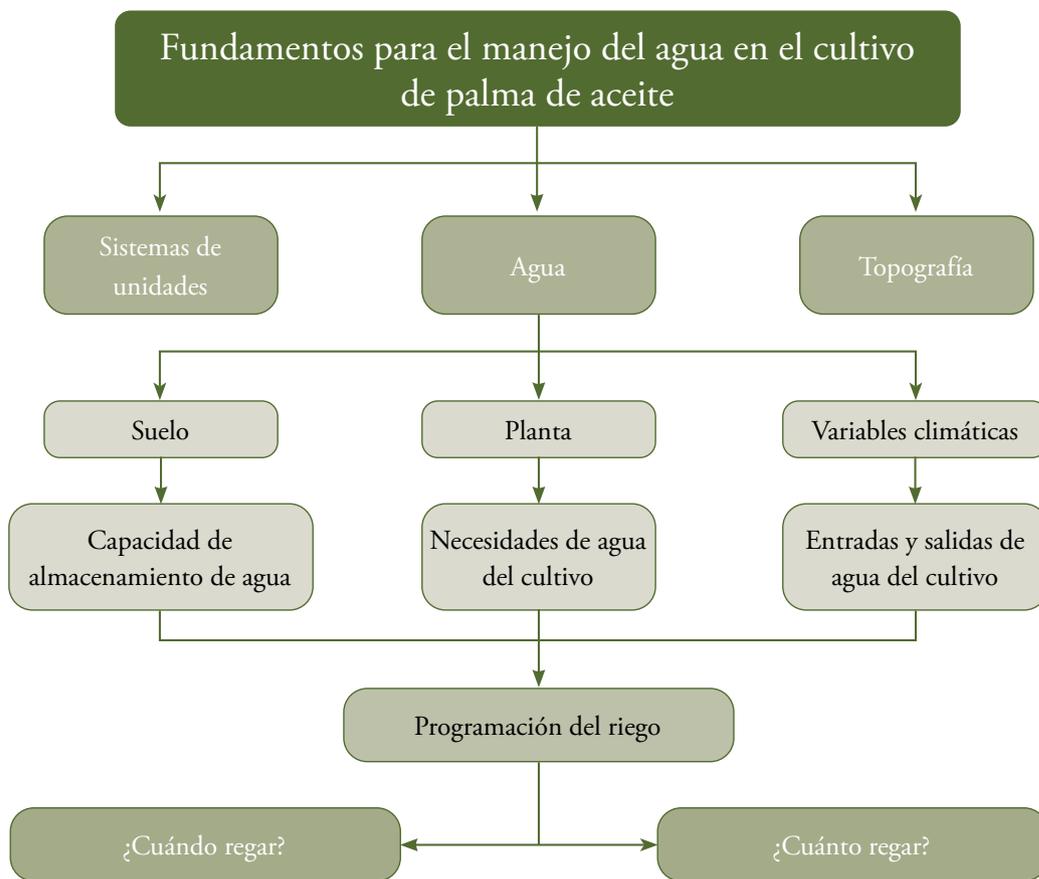
Unidad de aprendizaje 1. Fundamentos para el manejo del recurso hídrico en el cultivo de palma de aceite

Estructura de aprendizaje de la unidad	33
Explicación de la estructura	33
Preguntas orientadoras	34
Objetivos.....	34
Introducción	34
1.1 Sistema de unidades de medida	34
1.2 Conceptos básicos de topografía	37
1.3 Principios y conceptos básicos	38
Práctica 1. Determinación de humedad del suelo (CC, PMP y curvas de retención de humedad).....	51
Ejercicio 1. Cálculo de parámetros para la programación del riego en el cultivo de palma: LARA, tiempo y frecuencia de riego	52
Ejercicio 2. Caso ejemplo	53
Bibliografía.....	55



Relación suelo-agua-planta-atmósfera

Estructura de aprendizaje de la unidad



Explicación de la estructura

En esta unidad de aprendizaje se abordan los fundamentos para el manejo del riego en el cultivo de palma de aceite. Dentro de estos, inicialmente se indica el sistema de unidades de medida utilizado en estas actividades y los conceptos básicos de topografía, ya que esta es una tarea necesaria para el adecuado establecimiento de los diferentes sistemas de riego. Posteriormente se

explica la importancia del conocimiento sobre la relación fundamental entre suelo, agua, planta y atmósfera, pues permite saber cuánto, cómo y cuándo regar. Esto se complementa con una descripción de cada uno de los factores (suelo, cultivo, variables climáticas), y con el procedimiento para la determinación de los requerimientos de riego en el cultivo.

Teniendo en cuenta lo anterior, se destaca que el propósito de esta unidad es brindar a los participantes las herramientas necesarias para conocer la lámina, tiempo y frecuencia, parámetros esenciales para evaluar la eficiencia de un sistema de riego.

Preguntas orientadoras

El facilitador indagará a los participantes acerca de su conocimiento sobre los fundamentos para el manejo del agua en el cultivo de palma de aceite, y la experiencia propia para la determinación de los requerimientos de riego en su plantación. A continuación, se sugieren algunas preguntas.

1. Según su experiencia ¿cuáles son los parámetros que se deben tener en cuenta al momento de programar el riego?
2. ¿Qué sistemas de unidades de medida conoce? ¿Podría mencionarlos?
3. ¿Qué variables climáticas y edáficas se relacionan con la adecuada aplicación del riego?
4. ¿Podría establecer las entradas y salidas de agua en un cultivo de palma?
5. ¿Cómo se determina la lámina de agua aprovechable de un suelo y cuál es su importancia?
6. ¿Cómo se identifican las necesidades de agua de la palma de aceite en una zona específica?

Objetivos

Al terminar esta unidad de aprendizaje los participantes estarán en capacidad de:

- Conocer ampliamente los diferentes sistemas de unidades de medida para el cálculo de los distintos componentes de un sistema de riego.
- Estimar los valores de contenido de humedad del suelo en estado de saturación, capacidad de campo, punto de marchitez permanente y agua disponible total.
- Determinar las necesidades totales de agua para riego de un área específica cultivada con palma de aceite.

- Definir los momentos oportunos de riego y calcular la lámina a aplicar, según características climáticas y de suelos propios de una plantación, mediante la realización de un balance hídrico.

Introducción

El conocimiento de las relaciones agua-suelo-plantat-atmósfera (RASPA) reviste gran importancia en el riego agrícola. Al identificar la capacidad de retención de humedad de los suelos, la tasa de infiltración y el uso del agua por las plantas, se pueden plantear diseños de sistemas de riego eficientes que aseguren una adecuada y oportuna disponibilidad de agua para los cultivos, y por lo tanto incrementen su productividad.

En esta unidad de aprendizaje los participantes tendrán la oportunidad de afianzar sus conocimientos sobre los diferentes fundamentos básicos para el manejo del riego de un cultivo, y su importancia para establecer sistemas eficientes. Así mismo, los diferentes procedimientos para la determinación de cuándo y cuánto regar.

Para esto se cuenta con un soporte teórico, complementado con la descripción de los sistemas de unidades de medida utilizados en los ejercicios y prácticas, que están enfocados en afianzar los conocimientos adquiridos en el desarrollo de la unidad y su importancia para la evaluación de la eficiencia de los métodos de riego.

1.1 Sistema de unidades de medida

Antes de iniciar el aprendizaje sobre los fundamentos para el manejo del recurso hídrico en el cultivo de palma de aceite, es preciso recordar los sistemas de unidades de medida más utilizados. En esta guía se empleará el sistema internacional de unidades (SI), ampliamente usado a nivel nacional.

1.1.1 Magnitudes fundamentales

1.1.1.1 Medida: longitud [L]

La longitud es la magnitud física que expresa la cantidad de espacio o distancia que hay entre dos puntos

(Mendoza *et al.*, 2014), y nos permite medir el largo, ancho o alto de una cosa u objeto. De acuerdo con el Centro Nacional de Metrología (CENAM, 2001), la unidad en el sistema internacional es el metro (m) (Figura 1). A continuación, se muestran los múltiplos de esta unidad y sus respectivas equivalencias (Tabla 1).



Figura 1. Instrumento de medida de la longitud: decámetro.

Tabla 1. Unidades de medida de longitud más utilizadas

Nombre	Símbolo	Equivalencia
Milímetro	mm	1
Centímetro	cm	10 mm
Pulgada	in	2,28 cm
Metro	m	100 cm
Kilómetro	km	1.000 m

1.1.1.2 Medida: tiempo [T]

El tiempo es la magnitud que expresa la duración o separación de acontecimientos sujetos a cambio (Mendoza *et al.*, 2014). En el sistema internacional, su unidad de medida es segundos (s) (CENAM, 2001) (Figura 2), aunque también puede ser horas (h), minutos (m), días, meses y años (Tabla 2).



Figura 2. Cronómetro Fuente: <https://www.steren.com.mx/cronometro-deportivo-resistente-al-agua.html>

Tabla 2. Unidades de medida de tiempo más utilizadas

Nombre	Símbolo	Equivalencia
Segundo	s	1
Minuto	min	60 s
Hora	h	3.600 s
Día		86.400 s

1.1.1.3 Medida: masa [M]

La masa es la magnitud física que mide la cantidad de materia que posee un cuerpo (Hewitt, 2007). Su unidad de medida básica en el sistema internacional es el gramo (g) (CENAM, 2001) (Figura 3), y este a su vez puede ser expresado en unidades más grandes o pequeñas conocidas como múltiplos y submúltiplos, respectivamente, como se observa en la Tabla 3.



Figura 3. Instrumento de medida de la masa: gramera.

Tabla 3. Unidades de medida de masa más utilizadas

Nombre	Símbolo	Equivalencia
Gramo	g	1 g
Decagramo	da	10 g
Hectogramo	hg	100 g
Kilogramo	kg	1.000 g
Quintal métrico	q	100 kg (10 ⁵ g)
Tonelada métrica	t	1.000 kg (10 ⁶ g)

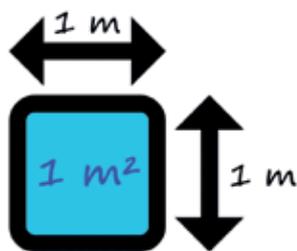
En el sector agrícola y en especial en el cultivo de palma de aceite, es muy utilizado el término tonelada (t) equivalente a 1.000 kg.

1.1.2 Magnitudes derivadas

Son aquellas que mediante cálculos pueden expresarse como producto de potencias de las unidades fundamentales (CEM, 2006), descritas anteriormente. Entre estas, las que se encuentran más relacionadas con el sector agrícola son: superficie, volumen, velocidad, densidad y presión.

1.1.2.1 Superficie

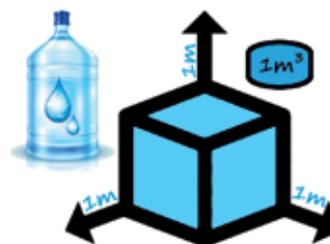
Es la magnitud que indica la extensión de un objeto en dos dimensiones: el largo y el ancho, y se expresa en unidades de longitud al cuadrado [L²]. De acuerdo con el SI, su unidad de medida es el metro cuadrado (m²) (Junta de Andalucía, n.d.) (Figura 4). A nivel agrícola la denominación más utilizada para áreas o superficies más grandes es hectárea (ha) (Tabla 4).

**Figura 4.** Unidad de medida de superficie**Tabla 4.** Unidades de medida de superficie más utilizadas

Nombre	Símbolo	Equivalencia
Metro cuadrado	m ²	1 x 10 ⁴ cm ²
Kilómetro	km ²	1 x 10 ⁶ m ²
Fanegada		6.400 m ²
Hectárea	ha	1 x 10 ⁴ m ²

1.1.2.2 Volumen

Es la magnitud que indica el espacio que ocupa un cuerpo en las tres dimensiones (ancho, largo y profundidad), y se expresa en unidades de longitud al cubo [L³] (Figura 5). La que le corresponde de acuerdo con el SI, es el (m³) (Wilson & Buffa, 2002). Al igual que la mayoría de las magnitudes, volúmenes más grandes o pequeños pueden ser enunciados en múltiplos y submúltiplos (Tabla 5).

**Figura 5.** Unidad de medida volumen**Tabla 5.** Unidades de medida de volumen más utilizadas

Nombre	Símbolo	Equivalencia
Mililitro	ml	1 cm ³
Centímetro cúbico	cm ³	1 ml
Litro	L	1.000 ml
Metro cúbico	m ³	1.000 L
Galón	Gal	3,78 L

1.1.2.3 Presión (P)

Es la magnitud que mide la fuerza en dirección perpendicular por unidad de superficie, y se define como la derivada de la fuerza con respecto al área (Raffino, 2020) (Figura 6). De acuerdo con el SI, la unidad es pascales (Pa), que equivale a un newton (N) de fuerza actuando sobre 1 m². A continuación, en la Tabla 6, se presenta las unidades más utilizadas.



Figura 6. Instrumento de medida de la presión: manómetro

Tabla 6. Unidades de medida de presión más usadas

Nombre	Símbolo	Equivalencia
Atmósfera	atm	1 atm = 1.023 kgf/cm ²
Pascal	Pa	1 Pa = 1N/m ²
Bar	bar	1 bar = 10 ⁵ pa
Milímetro de mercurio	mmHg	1 mmHg = 0,0013 bar

1.1.2.4 Velocidad

Es una magnitud que refleja el espacio recorrido por un cuerpo (X) en una unidad de tiempo (t), y se calcula dividiendo estas dos magnitudes (CEM, 2006). La velocidad se expresa en unidades de longitud [L] sobre tiempo [t]. El metro por segundo (m/s) es su unidad en el SI, pero puede efectuarse la conversión hasta llegar a otras equivalencias como km/h, mm/h, cm/h, etc.

Por otro lado, el **caudal**, a pesar de no ser considerado como una magnitud, es un concepto ampliamente utilizado en el área agrícola que define el volumen de agua que pasa por una sección transversal en un tiempo dado. Se expresa en unidades de volumen [L³] sobre tiempo [t]. De acuerdo con el SI, la unidad de medida es m³/s pero se pueden usar diferentes equivalencias tales como L/s, L/h, m³/h, etc.

1.2 Conceptos básicos de topografía

Todo diseño de sistemas de riego o drenaje requiere de una representación clara y precisa del terreno en el que se va a desarrollar. Para ello debe apoyarse en un trabajo topográfico que refleje con precisión las características de este.

La topografía es una herramienta importante para el manejo del agua y por lo tanto, es necesario tener claro los conceptos de los siguientes términos:

- **Levantamiento topográfico:** es un estudio técnico y descriptivo de un terreno, en el que se examina la superficie teniendo en cuenta sus características físicas (ríos, lagos, reservorios, caminos, bosques, etc.), geográficas y geológicas; también sus variaciones y alteraciones tales como represas, estanques, diques, drenajes o canales de alimentación de agua, entre otros (IGAC, 2018; FAO, n.d.). Una vez se reúnen todas estas características (acopio de datos), se procede con el trazado de un plano que refleje el terreno con una alta precisión (IGAC, 2018), para que sirva como instrumento de planificación para el diseño e instalación de un sistema de riego.
- **Altimetría:** es la parte de la topografía que estudia la elevación de los puntos sobre la superficie terrestre, para dar su posición relativa o absoluta, y la proyecta sobre un plano vertical, referida a un plano de comparación cualquiera o a una superficie de comparación como el nivel del mar (Alcántara, 2014).
- **Planimetría:** es una de las divisiones de la topografía, que consiste en proyectar sobre un plano horizontal los elementos de la cadena o poligonal sin considerar su diferencia de elevación (Alcántara, 2014).

- **Pendiente:** es la variación de distancia vertical o de altura en una distancia horizontal dada (FAO, n.d.).
- **Curvas de nivel:** son el resultado de la intersección del terreno con una serie de planos horizontales y equidistantes. Esa intersección genera unas series de líneas, generalmente curvas, que se caracterizan por tener la misma cota. Las curvas de nivel también reciben el nombre de isohipsas (León, n.d.).

1.3 Principios y conceptos básicos

1.3.1 Relación suelo-agua-planta-atmósfera

El conocimiento de las relaciones agua-suelo-planta-atmósfera (RASPA) (Figura 7) es fundamental para el riego agrícola, ya que permite diseñar sistemas que garanticen el aumento de la producción de los cultivos al brindarles una adecuada y oportuna disponibilidad de agua, haciéndolo en la forma más económica (Gurovich, 2003).

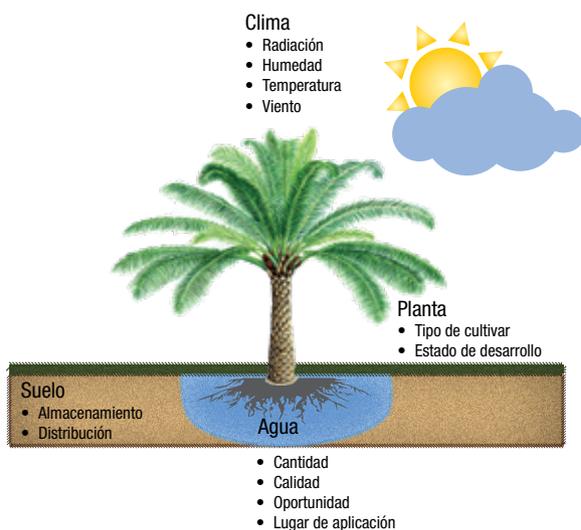


Figura 7. Representación gráfica de la relación suelo-agua-planta-atmósfera

Las plantas constituyen el principal factor de vida en la tierra ya que son el elemento fundamental de la cadena alimentaria, y dependen del agua, el suelo y la atmósfera (Rojas, 2007). El suelo sirve de sustento

y es proveedor de nutrientes para los cultivos. El agua compone entre el 80 % y 95 % de la masa de los tejidos en crecimiento de las plantas, y cumple varias funciones vitales en sus procesos tales como la fotosíntesis, transporte de nutrientes, regulación de temperatura, entre otros (López, 2000; Angella *et al.*, 2016). La atmósfera controla el suministro de agua, energía, oxígeno, nitrógeno y CO₂.

La relación de estos elementos es compleja y ocurre simultáneamente, por lo que hace difícil realizar un único análisis que incluya todos los factores. Tradicionalmente se analizan considerando pares de componentes, y luego se integran por medio de modelos de simulación (Rojas, 2007). En consecuencia, en esta unidad se explican primero las relaciones agua-suelo, después agua-planta y por último agua-atmósfera, conceptos que permitirán al finalizar, responder las preguntas cuánto y cuándo regar.

1.3.2 El agua y el suelo

El suelo es un sistema de gran complejidad, compuesto por una fase sólida (partículas de naturaleza mineral u orgánica), una líquida que es el agua, que llena total o parcialmente los espacios libres entre las partículas del suelo, y una gaseosa o de vapor en forma de aire que ocupa el sitio poroso entre las partículas del suelo que no está lleno con agua (Cenipalma, 2017).

Por lo anterior, el suelo se puede considerar como un depósito de almacenamiento de agua, aire y nutrientes para las plantas (Torres, 1995; Angella *et al.*, 2016). Esta capacidad de almacenamiento y disponibilidad depende de las características de cada suelo, por lo tanto, es importante conocer cómo están constituidos y las propiedades que intervienen o afectan la retención y movimiento del agua. En caso de requerir información más detallada sobre estas propiedades puede consultar la guía metodológica *Caracterización y adecuación de suelos para el establecimiento del cultivo de la palma de aceite* (Molina & Torres, 2015).

A continuación, se describen de manera general algunas características hidrodinámicas y los métodos para su determinación.

1.3.2.1 Textura del suelo

Es una de las propiedades más importantes del suelo, que incide en muchas otras de sus características y es esencial para el diseño de sistemas de riego, ya que juega un papel fundamental en el cálculo de las láminas (Cisneros, 2003).

La textura se relaciona con el tamaño de las partículas minerales del suelo: de menos de 2 mm de diámetro arcilla (< 0,002 mm), limos (0,002 – 0,05 mm) y arenas (0,05 – 2 mm), y con la proporción en que estos se hallen (Jaramillo, 2002). De acuerdo con la FAO, n.d. (1986), influye en la capacidad de retener, almacenar y brindar agua a las plantas, así como en la facilidad como se puede hacer la labranza.

Existen varias técnicas para determinar el porcentaje de distribución de las partículas según su tamaño. Las más conocidas son:

- **Por sedimentación:** se realiza en laboratorio y supone la completa dispersión de las partículas en agua, teniendo en cuenta que tienden a sedimentarse en relación con su tamaño (Universidad de Caldas, 2011). Entre estos métodos están el de Bouyoucos o hidrómetro y el de la pipeta, basados en la Ley de Stokes que hace referencia a la resistencia que ofrece un líquido a la caída de partículas sólidas (Tafur, 2005).

- **Organoléptica:** se lleva a cabo en campo y permite determinar la textura al tacto, al colocar una pequeña cantidad de suelo húmedo y frotarlo entre los dedos (Molina & Torres, 2015).

1.3.2.2 Estructura del suelo

Esta propiedad, al igual que la textura, es trascendental en el movimiento y almacenamiento del agua, y en la aireación y estabilidad del terreno (Tafur, 2005). Se define como la disposición y arreglo de las partículas individuales del suelo: arcilla, limos y arena (Ar, L y A), para constituir unidades compuestas denominadas agregados (FAO, n.d; USDA, 1997).

Es de gran importancia porque el arreglo que presenta la fase sólida determina el espacio disponible para la fase líquida y gaseosa, influyendo así en otras propiedades como porosidad, densidad aparente, régimen hídrico y térmico, permeabilidad, aireación, distribución de la materia orgánica e infiltración del suelo (Jaramillo, 2002; Cisneros, 2003).

Su determinación puede realizarse en campo, siendo necesario describir los tres parámetros que la califican tales como el tipo, la clase y el grado de desarrollo que presente (Universidad de Caldas, 2011). Los tipos de estructura más comunes se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Tipos de estructura comúnmente encontradas en el suelo

Estructura	Característica	
Granular y migajosa	Son las partículas individuales de Ar, L y A que están agrupadas en granos pequeños, facilitando el movimiento del agua en el suelo (infiltración rápida).	
Bloques o bloques subangulares	Corresponden a las partículas de suelo que se agrupan en bloques. Cuando estos son relativamente grandes pueden generar resistencia a la penetración y al movimiento del agua (infiltración moderada).	
Prismáticas y columnares	Partículas de suelo que han formado columnas o pilares verticales separados por fisuras verticales diminutas, pero definidas. El agua circula con mayor dificultad y el drenaje es deficiente (infiltración moderada).	

Continúa

Estructura	Característica	
Laminar	Partículas de suelo que están agregadas en láminas o capas finas que se acumulan horizontalmente una sobre otra. Esto dificulta notablemente la circulación del agua (infiltración lenta).	
Masivos o sin estructura	Las partículas se encuentran sueltas sin formar agregados o unidas formando una masa de suelo endurecido, lo que dificulta la identificación de estructura. La infiltración es extremadamente lenta.	

Fuente imágenes: <http://edafologia.net/introeda/tema04/estr.htm>

1.3.2.3 Densidad del suelo

Dado que el suelo está conformado por tres fases (sólida, líquida y gaseosa) se consideran dos tipos de densidades: real (D_r) y aparente (D_a).

La **densidad real** relaciona la masa por unidad de volumen de las partículas sólidas del suelo, por lo que no tiene en cuenta el espacio poroso. Generalmente se expresa en g/cm^3 y ya que se trata de la densidad de la fracción sólida, su valor es casi constante y puede tomarse el rango entre 2,6 y 2,7 g/cm^3 para suelos minerales. Sin embargo, Tafur (2005) menciona que cuando los contenidos de materia orgánica son significativos, este parámetro puede estar en el orden de 2,0 g/cm^3 .

La **densidad aparente** (Figura 8) relaciona la masa total de suelo seco (secado a 105 °C durante 24 h) con su volumen total, es decir, incluye el volumen de sólidos y de poros (sólidos, aire y agua) (FAO, 2006; Angella *et al.*, 2016).

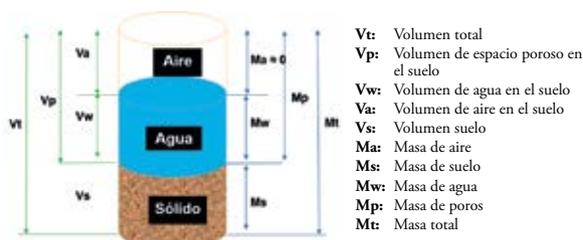


Figura 8. Esquema representativo de la masa y volumen de los componentes del suelo

$$D_a = \frac{M_s}{V_t} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

D_a = densidad aparente (g/cm^3)

M_s = masa de suelo seco (g)

V_t = volumen total (cm^3)

Dada la condición de tener en cuenta el espacio poroso, los valores de D_a varían en función de las propiedades de los suelos, principalmente con la textura y el contenido de materia orgánica (M.O). Sin embargo, a continuación, se presentan algunos valores medios (Tabla 8).

Tabla 8. Densidad aparente de los suelos de acuerdo con la textura

Textura	D_a (g/cm^3)
Arenoso	1,4 – 1,8
Franco	1,3 – 1,4
Arcilloso	1,0 – 1,3
Suelos orgánicos	0,7 – 1,0

Fuente: Rincón A, 2020

Teniendo en cuenta lo anterior, esta propiedad puede ser usada como indicador del grado de compactación de los suelos. A medida que los valores de densidad aparente

umentan, evidencian que hay una reducción de la porosidad total del suelo. Además, también es fundamental para expresar el contenido de humedad del suelo con base en volumen y/o lámina equivalente (Tafur, 2005), lo que será explicado más adelante en esta unidad.

Para su determinación existen diferentes métodos y se puede realizar con muestras alteradas e inalteradas (USDA, 1999). En campo está el de cilindros de volumen conocido (el suelo dentro del anillo no debe ser disturbado), y en laboratorio (1) el del terrón o parafina y (2) el de la excavación para suelos gravillosos y rocosos (USDA, 1999).

1.3.2.4 Porosidad del suelo

La porosidad total del suelo es el volumen que no está ocupado por sólidos, es decir, el que hay disponible para los líquidos y los gases (Jaramillo, 2002). Está integrado por los macroporos, que contribuyen en mayor medida a la aireación y al movimiento del agua

en el suelo; y por los microporos, en los que ocurre mayoritariamente el almacenamiento de humedad edáfica (FAO, 2020).

Esta propiedad se puede expresar como el porcentaje de poros en relación al volumen total del suelo, y se calcula con la siguiente ecuación (Danielson & Sutherland, 1986):

$$\eta = \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) * 100 \% \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

η = porosidad (%)

Da = densidad aparente (g/cm^3)

Dr = densidad real (g/cm^3)

A continuación se presenta un resumen del efecto de cada una de estas características en la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (Tabla 9).

Tabla 9. Relación de la textura del suelo con otras propiedades físicas. Adaptado de Angella *et al.*, 2016 y Torres *et al.*, 2004

Suelos	Características	Infiltración y permeabilidad	Retención de humedad	Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo
Arenosos	Poseen poros grandes, pero el volumen total de estos es pequeño.	Alta	Muy baja	Baja (implica aplicar riegos frecuentes en periodos secos).
Francos	Tienen características intermedias entre suelos arenosos y arcillosos.	Moderada	Media	Adecuado almacenamiento y disponibilidad de agua para los cultivos.
Arcillosos	Las arcillas son partículas laminares de poco peso y de una gran área superficial. Poseen poros pequeños y su volumen total es alto.	Baja	Muy alta	Alta (necesidad de riego menos frecuente).

1.3.2.5 Humedad del suelo

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 mediante riego (Gurovich, 2003).

El agua que almacenan los suelos se puede expresar de tres formas: (1) con base en masa: W (%), (2) con base en volumen: θ (%) y (3) con base en lámina: Lam (mm) o profundidad equivalente. A continuación, se detalla el procedimiento para determinar la humedad del suelo en cada una de las tres formas (Tabla 10).

Tabla 10. Formas de expresar la humedad del suelo y metodologías para su determinación

W (%)	θ (%)	Lam (mm)
(1) Procedimiento	(2) Procedimiento	(3) Procedimiento
<ul style="list-style-type: none"> • Tomar la muestra de suelo al que se quiere determinar la humedad. • Hallar la masa del suelo con esa humedad con una balanza (Msh). • Secar la muestra en el horno entre los 105 y 110 °C por 24 horas o hasta tener peso constante. • Identificar la masa del suelo seco (Mss) en la balanza. • $Mw = (Msh - Mss)$ 	<p>Esta expresión indica el volumen de agua contenido en un volumen de suelo (una muestra), que involucra tanto volumen de sólidos como de poros. Por lo tanto:</p> $\theta \% = W \% * \rho$ <p>Donde: ρ es el peso específico del suelo y resulta de la relación entre la densidad aparente (D_a) y la densidad del agua (D_w) (ρ es adimensional).</p>	<p>Cuantifica, para una profundidad dada de suelo, la correspondiente al agua expresada en unidades lineales. Por lo tanto, su determinación se realiza utilizando la siguiente ecuación:</p> $Lam = \theta * profundidad$ <p>Pero $\theta \% = W \% * \rho$ Entonces: $Lam = W * \rho * profundidad$</p>
Ecuación: $W \% = \frac{Mw}{Mss} * 100$	Ecuación: $\theta \% = W \% * \rho$	Ecuación: $Lam = W * \rho * profundidad (mm)$

1.3.2.6 Retención de agua en el suelo

No todo el volumen de agua almacenado en el suelo está disponible para las plantas y, del que está disponible, no todo se puede absorber con igual facilidad. Esto quiere decir que el agua aprovechable para las plantas depende fundamentalmente de la fuerza con la que el suelo retiene la humedad (Torres, 1995), de acuerdo con los siguientes niveles:

- **Saturación:** se refiere al nivel de humedad del suelo en el que todos los poros (micro, meso y macroporos) se encuentran llenos de agua (Figura 9). Esto ocurre durante un periodo relativamente corto



Figura 9. Esquema de un suelo saturado. Adaptado de Brady (1996)

después de una lluvia o riego. En la fracción de los macroporos el agua no es retenida, y por lo tanto se pierde por efecto de la gravedad.

- **Capacidad de campo (CC):** se conoce como el límite superior o nivel de humedad que se consigue dejando drenar el agua de un suelo saturado. Corresponde al agua retenida en los microporos del suelo por las fuerzas de cohesión entre las moléculas de agua, y por la adhesión de estas con las partículas de suelo (Torres, 1995). El potencial mátrico en este momento corresponde a un valor que oscila entre 0,1 – 0,3 Atm, dependiendo de la textura del suelo (Torres *et al.*, 2004) (Figura 10).



Figura 10. Esquema de un suelo a capacidad de campo. Adaptado de Brady (1996)

- **Punto de marchitez permanente (PMP):** corresponde al nivel de humedad en el que el agua forma películas delgadas alrededor de las partículas del suelo, retenidas con tanta fuerza, que las plantas no pueden extraerlas y en consecuencia mueren por marchitamiento (Torres, 1995) (Figura 11). Se llega a este nivel, si el terreno no tiene ningún otro aporte de agua por precipitación o riego, y la evaporación y el consumo de la planta (transpiración) empiezan a agotar el agua almacenada y retenida en el suelo. La presión necesaria para comenzar a extraer el agua que contiene un suelo en su punto de marchitez es de 15 atmósferas. Sin embargo, algunas especies pueden marchitarse irreversiblemente mucho antes o después de que se alcance este valor (Tafur, 2005).

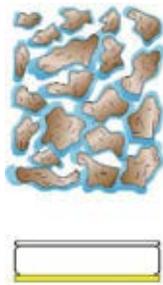


Figura 11. Esquema de un suelo en punto de marchitez permanente. Adaptado de Brady (1996)

- **Suelo seco:** en este nivel de humedad, todos los poros se encuentran llenos de aire.

Existen varios métodos para determinar la retención de humedad en el suelo, pero el más común es establecer el potencial total del agua mediante el uso de ollas y platos de presión en condiciones de laboratorio (Jaramillo, 2002). Así se somete el suelo a las presiones antes mencionadas, y se contrasta con el contenido de humedad de la muestra en el momento dado.

A nivel de campo también se puede hacer a CC y PMP, con los siguientes métodos:

Capacidad de campo (CC): se elaboran unas bordas rectangulares de 100 cm x 100 cm en las que se aplica agua suficiente para saturar el perfil del suelo.

Posteriormente, la superficie se cubre con plástico negro para evitar la evaporación y de esta manera crear condiciones de equilibrio de la humedad dentro del perfil del suelo. Transcurridas 48 horas de haber saturado el perfil, se tomarán muestras de humedad en función de la profundidad (Figura 12).

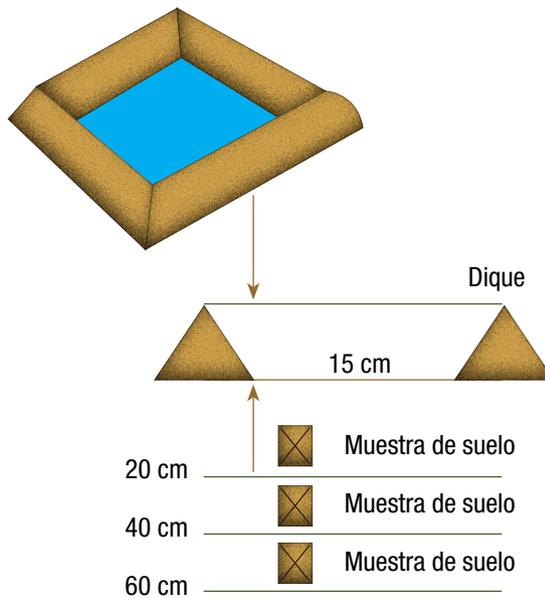


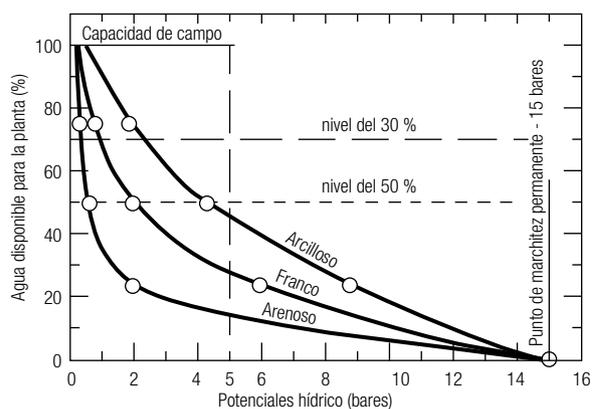
Figura 12. Representación gráfica del procedimiento realizado en campo para la determinación de CC. Adaptado de Torres *et al.* (2004)

Punto de marchitez permanente (PMP): se recolectan muestras de 5 kg a las diferentes profundidades del perfil del suelo, seleccionadas y tomadas para la humedad a CC. Posteriormente se colocan en bolsas plásticas, en donde se sembrarán tres semillas de frijol que serán usadas como plantas indicadoras de la marchitez (Figura 13). Estas se deben mantener con buenas condiciones de humedad hasta que tengan tres hojas verdaderas o 15 a 20 cm de altura. Se instala un plástico en la superficie de las bolsas para evitar las pérdidas de agua por evaporación, y se aíslan para que no obtengan agua. Al momento en que las plantas muestren signos de marchitez (observándolas todos los días), se deben tomar muestras para determinar la humedad gravimétrica correspondiente al PMP.



Figura 13. Ejemplo de plantas utilizadas en la determinación de PMP por método biológico

Con los datos recolectados se construye la curva de retención de humedad del suelo, utilizada para relacionar el potencial mátrico con el contenido hídrico. Para ilustrar este concepto se presenta la Figura 14 tomada de Martin (2010).



Función de las curvas de retención de humedad
Estimar los valores de contenido hídrico del suelo a CC, PMP y agua disponible total, definir el momento oportuno del riego y calcular la lámina a aplicar.

Figura 14. Comportamiento de las curvas de retención de humedad características de algunas texturas de suelo.
Fuente: Martin (2007)

Desde el punto de vista agronómico, la humedad que interesa para el desarrollo de los cultivos es la

comprendida entre la de CC y la de PMP, rango que se conoce como **agua aprovechable (AA) o agua útil**. Torres *et al* (2004) mencionan que, aunque existen algunas plantas que pueden extraer humedad a niveles por debajo de PMP, la mayoría de los cultivos reducen su crecimiento cuando el contenido de humedad está cercano a este punto. Si el contenido se aproxima a CC, el agua es tomada fácilmente por los cultivos, pero a medida que esta se reduce en el suelo es retenida con más fuerza, y las plantas deben hacer un mayor esfuerzo para extraerla. Así, su evapotranspiración ocurre a una tasa inferior a la potencial, incidiendo en su desarrollo. Este momento es identificado como un nivel crítico de humedad (NH). Generalmente para muchos cultivos, los riegos se aplican cuando se consume el 50 % del AA y para los más sensibles entre 25 y 30 % (WWF, 2005).

El agua almacenada entre la humedad a CC y NH se conoce como **agua rápidamente aprovechable (ARA)**. A continuación, se indica el procedimiento para su determinación.

$$AA (\%) = (\%W_{cc} - \%W_{PMP}) \quad (\text{Ec. 3})$$

$$ARA (\%) = (\%W_{cc} - \%W_{PMP}) * fa \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

AA (%) = agua aprovechable (%)

ARA (%) = agua rápidamente aprovechable (%)

$\%W_{cc}$ = humedad gravimétrica a capacidad de campo (%)

$\%W_{PMP}$ = humedad gravimétrica en punto de marchitez permanente (%)

fa = factor de agotamiento, $0 < fa < 1$. Cuando se desconoce el valor de fa se puede asumir 0,5

Esta información puede expresarse en términos de lámina, derivando así los conceptos de lámina de agua aprovechable (LAA) y lámina de agua rápidamente aprovechable (LARA) que pueden ser calculados así:

$$LAA = \frac{AA (\%)}{100} * \rho * Pe \quad (\text{Ec. 5})$$

$$LARA = \frac{AA (\%)}{100} * \rho * fa * Pe \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

LAA = lámina de agua aprovechable (mm)

LARA = lámina de agua rápidamente aprovechable (mm)

AA (%) = agua aprovechable (%)

ARA (%) = agua rápidamente aprovechable (%)

ρ = peso específico del suelo (adimensional). $\rho = D_a / D_w$

D_a = densidad aparente (g/cm^3)

D_w = densidad del agua = $1 \text{ g}/\text{cm}^3$

fa = factor de agotamiento que normalmente es 0,5

Pe = profundidad efectiva de raíces (mm)

En el riego, estos dos conceptos son relevantes pues el primero (LAA) permite establecer la cantidad de agua disponible para las plantas, que puede ser almacenada a una profundidad de suelo específica (Calvache, 2002), y por otro lado, la LARA es la cantidad de agua que el suelo debería tener como mínimo, para que la producción de los cultivos sea siempre la máxima posible (Fernández *et al.*, 2010).

1.3.2.7 Infiltración

Ayuda a determinar el tiempo durante el cual, el agua debe estar en contacto con el suelo para alcanzar una humedad a capacidad de campo en el momento de riego. De acuerdo con Forero (2000), la infiltración considera el movimiento vertical del agua en el suelo, y está estrechamente relacionada con los procesos de capilaridad y las fuerzas asociadas con la adhesión y la cohesión de las partículas del suelo. USDA (1999) menciona que la velocidad a la que el agua entra en el suelo es la de infiltración.

La velocidad de infiltración es la relación entre la lámina de agua que se infiltra y el tiempo que tarda en

hacerlo, y se expresa generalmente en cm/h o cm/min . Permite conocer la capacidad del suelo de absorber agua. Así, en condiciones de campo, es máxima al comenzar la aplicación y disminuye conforme aumenta la cantidad de agua que ya ha entrado en él (Cisneros, 2003). Si se continúa agregando agua, llega un momento en que la velocidad es más o menos constante y se denomina velocidad de infiltración básica (Mercado, 1989).

Uno de los métodos más utilizados para evaluar la infiltración del suelo en campo es el de anillos infiltrómetros (Jaramillo, 2002). Consiste en introducir verticalmente dos anillos en forma concéntrica y hasta una profundidad de 15 cm. Luego se pone un plástico en el cilindro interior y una lámina de agua de 12 cm de altura. Posteriormente se vierte agua en el espacio entre el cilindro exterior y el interior, y se deja penetrar en el suelo. Al cabo de unos minutos, se retira el plástico y se realizan las lecturas de la lámina infiltrada a diferentes intervalos de tiempo, hasta que esa rata de entrada se vuelva constante. Las lecturas de tiempo y entrada de agua se llevan a cabo hasta una rata de infiltración más o menos constante en el suelo (aproximadamente 120 minutos).

Para la interpretación de los datos que permiten determinar la infiltración básica, las gráficas de infiltración instantánea y acumulada, se tienen diferentes metodologías y modelos, siendo el más utilizado el de Kostiakov (Walker, 1989):

$$I = c * t^m \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

I: velocidad de infiltración (cm/hora)

c: infiltración inicial (cm/hora).

t: tiempo (minutos)

m: pendiente de la curva

1.3.3 Sistema agua y atmósfera

El agua en el planeta está en continuo movimiento y se encuentra en tres estados: sólido, líquido y gaseoso.

Como se observa en la Figura 15, en su fase sólida se halla principalmente como hielo en los polos; en su estado líquido conforma las aguas superficiales y subsuperficiales, tales como ríos quebradas, mares, océanos, etc. El agua superficial puede ser evaporada o condensada (pasa de líquido a vapor) por la acción del calor irradiado por el sol, ascendiendo a la atmósfera y formando eventualmente las nubes. El enfriamiento del vapor genera la precipitación (lluvia, nieve o granizo) que devuelve el agua a la superficie del suelo, o se infiltra hacia capas más profundas del subsuelo formando las aguas subterráneas denominadas acuíferos, o se evapora nuevamente para completar el ciclo hidrológico (Fernández *et al.*, 2010).

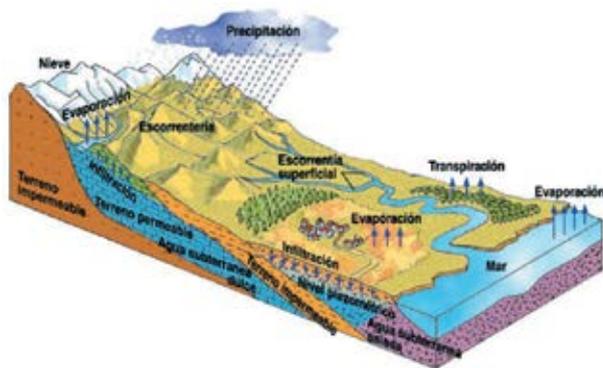


Figura 15. Esquema del ciclo hidrológico. Fuente: Fernández *et al.* (2010)

Del 100 % del agua que ocupa el planeta, el 97,5 % corresponde a la salada de los mares y océanos, y el 2,5 % al agua dulce, de los que casi el 70 % no está disponible para consumo humano, debido a que se encuentra en forma de glaciares, nieve o hielo.



Figura 16. Distribución del agua en la tierra. Fuente FAO/ONU

Ahora bien, de ese 1 % de agua realmente disponible a nivel mundial para el hombre, aproximadamente el 69 % se utiliza para fines agropecuarios, 19 % en la industria y el 12 % para uso doméstico (Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, n.d.).

1.3.4 Sistema planta-agua

Esta relación es importante, ya que el agua condiciona directa o indirectamente la mayoría de los procesos fisiológicos de las plantas (Angella *et al.*, 2016). Es tomada desde el suelo por el sistema radical, principalmente por los pelos radicales o absorbentes, gracias a la diferencia de presión hídrica entre el suelo y la raíz, verificándose un movimiento radial del agua que pasa a través de las células corticales al tejido del xilema. Este se encarga de transportar la savia bruta hasta las hojas, para ser usada en el proceso de fotosíntesis (Torres *et al.*, 2004).

1.3.4.1 Funciones del agua en las plantas

Según WWF (2005), algunas de las funciones esenciales que el agua desempeña en las plantas son:

a. Agua de constitución y sostén

Aproximadamente el 80 % de una planta es agua, que es imprescindible para que mantenga su estructura.

b. Transporte

En el suelo se encuentran diluidas muchas sustancias que, al ser absorbidas por las raíces, ascienden y son transportadas a los órganos fotosintéticos de las plantas ubicados en las hojas. Esta sustancia conocida como *savia bruta* llega a las hojas donde se realiza la fotosíntesis, a la vez que se lleva a cabo la transpiración en la que moléculas de agua salen por los estomas. Finalmente, los productos sintetizados en las hojas durante la fotosíntesis, conocidos como *savia elaborada*, mezcla de azúcares, aminoácidos, sales y agua, son conducidos desde la zona de producción (hojas) hacia la de consumo (tallos, raíces, frutos y semillas, etc.) a través del floema (García *et al.*, 2012).

c. Transpiración y regulación térmica

Las plantas, al igual que los demás seres vivos, necesitan para su correcto funcionamiento mantenerse dentro de un intervalo de temperaturas. Cuando esta sube, desprenden vapor de agua por los estomas de las hojas para regularla. Según Torres *et al.* (2004), la mayor parte del agua absorbida por las plantas es liberada a la atmósfera en forma de vapor, y solo entre el 1 % y 2 % es utilizada para la formación de los tejidos.

La velocidad de la transpiración depende de factores ambientales como: la radiación solar, la humedad relativa, la temperatura y el viento (Bidweell, 1979).

1.3.4.2 Necesidad de agua del cultivo

Como se evidenció anteriormente, las plantas consumen agua para desarrollarse adecuadamente. Las necesidades hídricas o consumo de agua de los cultivos son representadas por la evapotranspiración (ET), la cual es la suma de dos procesos, principalmente la transpiración de la cubierta vegetal y la evaporación de agua desde la superficie del suelo (Pereira *et al.*, 2010; FAO, 2006).

La transpiración se refiere a la pérdida de agua desde los tejidos de las plantas (estomas) en forma de vapor y la evaporación es el agua contenida en el suelo que se convierte en vapor de agua por acción de la energía que llega al suelo en forma de radiación solar y temperatura del aire (FAO, 2006).

Existen dos denominaciones de ET: la evapotranspiración del cultivo (ET_c), esencial para la determinación de los requerimientos de agua de un cultivo específico, y la evapotranspiración de referencia (ET_o), que se establece por métodos empíricos.

- **Evapotranspiración de cultivo (ET_c)** o uso consuntivo, es el consumo diario de agua de una planta, y corresponde al proceso combinado del agua perdida por evaporación directa desde el suelo y la absorbida por las raíces, que luego se pierde por la transpiración de las hojas.

La ET_c se afecta por factores como el suelo, el clima y la planta. Cuando la humedad del suelo es alta (humedad a CC), las plantas pueden transpirar a su máxima capacidad. En este momento la evapotranspiración es la potencial (ET_p). A medida que la humedad baja a niveles intermedios entre CC y PMP, las plantas evapotranspiran a una tasa inferior a la potencial, y se conoce como evapotranspiración actual (Et) que es la que se usa para asignar los requerimientos de agua de los cultivos.

Existen diferentes metodologías para determinar la evapotranspiración en cultivos, entre ellas la implementación de lisímetros. Sin embargo, para la palma de aceite resulta ser costosa, por lo que autores como Corley *et al.* (1981) y Huan *et al.* (1994) mencionan que se puede usar el método de balance de agua para su determinación:

$$\Delta S = P + I \pm qd - ET - R \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

ΔS : cambio en contenido de humedad en el suelo

P : precipitación, mm

I : riego aplicado, mm

qd : agua perdida o ganada por filtraciones de drenaje o ascenso capilar, mm

ET : evapotranspiración, mm

R : escorrentía, mm

Según la FAO (2006), la ET_c puede establecerse mediante la siguiente ecuación:

$$ET_c = ET_o * K_c \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde:

ET_c = evapotranspiración del cultivo (mm/día)

ET_o = evapotranspiración de referencia (mm/día)

K_c = coeficiente de cultivo (adimensional)

Como se observa en la Figura 16, el coeficiente de cultivo (K_c) de acuerdo con la FAO (2006), es un factor que varía principalmente en función de las características particulares del mismo y la cantidad de agua que extrae del suelo a medida que se va desarrollando, desde la siembra hasta la recolección (Alocén, 2007).

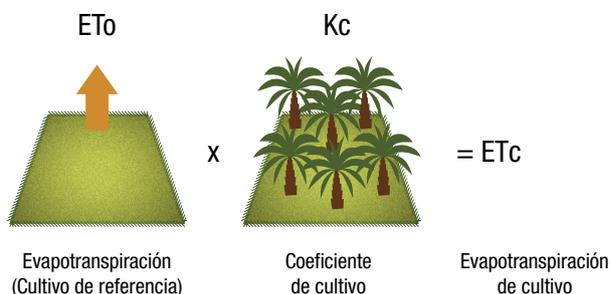


Figura 16. Representación gráfica de la evapotranspiración de cultivo E_{Tc}

- **Evapotranspiración de referencia (E_{To}):** se define como la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua (FAO, 2006). El cultivo de referencia corresponde a uno hipotético de gramíneas (un pasto) de 8 a 10 cm de altura, que debe estar muy bien regado, abonado y en buen estado sanitario.

Dado que no hay restricciones de humedad, los únicos factores que afectan la E_{To} son los parámetros climáticos, por lo que también pueden ser determinados a partir de datos meteorológicos. Según la FAO (2006), el método más recomendado es el de Penman-Monteith. Es importante tener claro que la E_{To} expresa el poder evaporante de la atmósfera en alguna región y época del año específicas, y no considera las características del cultivo y suelo. Esta E_{To} puede ser usada para determinar la E_{Tc} mediante la ecuación 9.

Otros métodos que pueden ser utilizados para la estimación de la E_{To} son el tanque evaporímetro (Allen *et al.*, 2006) (Figura 17) o el tanque cenirrómetro (Figura 18) (Torres J & Cruz R, 1995). A continuación se indican las ecuaciones para cada método:

Tanque evaporímetro:



Figura 17. Tanque evaporímetro

$$E_{To} = K_p \times EV \text{ (Ec. 10)}$$

Dónde:

EV: Evaporación del tanque clase A (mm)

K_p : Coeficiente del tanque (está en función de condiciones meteorológicas, se puede usar el valor 0,85)

Tanque cenirrómetro:



Figura 18. Tanque cenirrómetro

$$ET_o = 0.91 \times K_p \times EV$$

Dónde:

EV: Evaporación registrada en el cenirómetro (mm)

K_p: Coeficiente del tanque (está en función de condiciones meteorológicas, se puede usar el valor 0,85)

0.91: Factor de corrección de los valores de EV registrados en el tanque cenirómetro para convertirlos en EV del tanque Clase A

1.3.5 Consideraciones para la programación del riego

Como lo indica Torres *et al.* (2004), para efectuar una programación de riego ideal, es necesario conocer la relación suelo-agua-planta-atmósfera a fin de evitar aplicar agua en exceso o someter el cultivo a déficit de humedad, que pueden afectar la producción. Por esto, la finalidad de la Unidad 1 es inicialmente afianzar los conocimientos en esta temática. A continuación, utilizando los conceptos y conocimientos adquiridos se debe responder a dos incógnitas importantes en el manejo del riego: cuándo y cuánto regar.

1.3.5.1 ¿Cuándo regar?

Este es uno de los aspectos principales de la operación de un sistema de riego y hace referencia a la frecuencia, es decir, al intervalo que transcurre entre dos riegos consecutivos (Gurovich, 2003). Dicha frecuencia depende fundamentalmente de la disponibilidad de agua para el riego, la capacidad del suelo para almacenar el agua y la necesidad de agua de los cultivos (ET_c).

Como se explicó anteriormente, se recomienda que el agua almacenada en la zona de raíces no sea extraída en su totalidad por los cultivos, siendo una práctica común dejar un cierto nivel (factor de agotamiento) comprendido entre el 50 y 60 % de la capacidad total para el cultivo de palma (FAO, 2006).

La frecuencia de riego se puede determinar por medio de un método empírico (relación matemática), y uno práctico que se basa en la realidad del campo (Calvache, 2002).

Método empírico

$$Fr = \frac{LARA \text{ (mm)}}{ET_c \left(\frac{\text{mm}}{\text{día}}\right)} \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde:

Fr = frecuencia de riego (días)

LARA = lámina de agua rápidamente aprovechable (mm)

ET_c = evapotranspiración del cultivo o uso consuntivo promedio diario para ese periodo (mm/día)

Método práctico

Consiste en determinar diariamente el contenido de humedad del suelo o su tensión en diferentes sitios en el campo, mediante el uso de tensiómetros, sensores de humedad o por el método gravimétrico. Se debe realizar la calibración de estos equipos, y definir el valor de humedad o tensión del suelo en donde los cultivos no sufren de estrés hídrico. Una vez se llegue a este valor predeterminado se aplica nuevamente el riego.

1.3.5.2 ¿Cuánto regar?

Este aspecto se relaciona con el tiempo de riego o número de horas en que el agua debe escurrir sobre el suelo para que infiltre y moje la zona de raíces de las plantas. Para su determinación se requiere conocer la capacidad de almacenamiento de agua del suelo (AA), la facilidad que dicho suelo tiene para infiltrar durante el tiempo de riego y la tasa o velocidad de aplicación.

Para establecer el tiempo de riego en cada método se puede tener en cuenta la siguiente ecuación:

$$Tr = \frac{(\text{lámina CC-lámina actual}) \text{ (mm)}}{\text{tasa de aplicación} \left(\frac{\text{mm}}{\text{h}}\right)} \times \text{Eficiencia de riego} \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde:

Lámina CC: lámina de agua a capacidad de campo (mm)

Lámina actual: lámina de agua actual (mm)

Tasa de aplicación o pluviometría (mm/ha)

A continuación, se indican las ecuaciones para determinar la tasa de aplicación (mm/h) según diferentes métodos de riego:

Riego por aspersión:

$$Pluv_{asp} (mm/h) = \frac{Q_{aspersor} (\frac{L}{h})}{S_M (m) \times S_L (m)} \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde:

$Pluv_{asp}$: pluviometría aspersor (mm/h)

$Q_{aspersor}$: caudal aspersor (L/h)

S_M : distancia entre aspersores (m)

S_L : distancia entre laterales (m)

Riego por goteo:

$$Pluv_{got} (mm/h) = \frac{Q_{gotero} (\frac{L}{h}) \times \# \text{ goteros por planta}}{\text{Área aferente (m}^2\text{)}} \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde:

$Pluv_{got}$: pluviometría gotero (mm/h)

Q_{gotero} : caudal del gotero (L/h)

goteros por planta: número de goteros por planta

Área aferente es la que abarca una palma de aceite *Elaeis guineensis*, el cual es igual a 70 m²

Riego por surcos anchos y riego por compuertas

$$Pluv_{comp/surco} (mm/h) = \frac{3.6 \times Q_{compuerta \text{ o entrada surco}} (\frac{L}{s})}{\# \text{ palmas por surco} \times \text{Área aferente (m}^2\text{)}} \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde:

$Pluv_{comp/surco}$: pluviometría de riego por compuertas o surcos anchos (mm/h)

$Q_{compuerta \text{ o entrada al surco}}$: caudal de la compuerta o de entrada al surco (L/s)

palmas por surco: número de palmas regadas por un surco

Área aferente es la que abarca una palma de aceite *Elaeis guineensis*, el cual es igual a 70 m²

Programación del riego

Como se indicó anteriormente, conocer cuándo regar depende del consumo de agua por parte del cultivo (evapotranspiración) y de los aportes de humedad que pueda tener el suelo por riego, precipitación y/o aporte capilar del nivel freático. Para su determinación se utiliza el método de **balance hídrico del suelo**, herramienta que se expresa matemáticamente en la siguiente ecuación:

$$\Delta S = (P + R + A_c) - (ET_c + Es + P_p)$$

$$\Delta \theta = (P + R + A_c) - (ET_c + Es + P_p) \quad (\text{Ec. 16})$$

$\Delta \theta$ = aportes - pérdidas

Donde:

$\Delta \theta$ = variación de la reserva de agua en el suelo

P = precipitación

R = dosis de riego

A_c = aporte capilar

ET_c = evapotranspiración de cultivo

Es = escorrentía

P_p = percolación profunda

La ecuación 12 se puede simplificar si no se considera el aporte capilar, la escorrentía ni la percolación profunda, cuando estas son despreciables:

$$\Delta \theta = P + R - ET_c \quad (\text{Ec. 17})$$

Donde despejando R

$$R = \Delta \theta - P + ET_c \quad (\text{Ec. 18})$$

La determinación del balance hídrico del suelo con la respectiva cuantificación de los parámetros que lo constituyen debe realizarse diariamente para una adecuada gestión del riego.

Práctica 1. Determinación de humedad del suelo (CC, PMP y curvas de retención de humedad)

Objetivo

Al finalizar esta práctica los participantes estarán en capacidad de establecer las humedades de un suelo a capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

Orientaciones para el facilitador

Para asegurar un buen desarrollo de la actividad se sugiere al facilitador considerar lo siguiente:

- Unas semanas antes, con el mismo suelo con el que se llevará a cabo la práctica, se deben preparar las muestras para la determinación de la humedad a punto de marchitez permanente. Por lo tanto, tome y ponga las muestras en bolsas plásticas, y siembre en ellas semillas de frijol. Para el día de la práctica se requiere que tenga bolsas en diferentes estados de desarrollo del frijol, principalmente cuando están en PMP.
- 24 horas antes de la actividad, en el área seleccionada para la misma, ejecute el proceso para determinar muestras de suelo a CC, tiempo preciso para tenerlo bajo esta condición de humedad. Así, el día de la actividad, los participantes podrán desarrollar todo el procedimiento requerido.
- Comparta el objetivo de la práctica. Solicítele que tengan en cuenta los procedimientos indicados en la sesión teórica y en el material que se les entregó, con el resumen de los pasos sobre la preparación del suelo para la toma de muestras.
- Pida que conformen grupos de trabajo de tres personas, seleccionando un representante para exponer los resultados en la plenaria. Explique que los resultados de esta práctica serán utilizados para el desarrollo del siguiente taller en el salón.
- Entregue a cada grupo el procedimiento y lea las instrucciones, cerciorándose de que hayan comprendido en su totalidad.

- Facilite a cada grupo los materiales necesarios para el desarrollo de la actividad y la toma de muestras de suelo, así como las semillas de frijol para hacer el procedimiento de PMP.
- Ordene iniciar la práctica e informe que tienen dos horas para su ejecución.
- Posterior a la actividad, pida a los participantes que expongan ante los demás las dificultades presentadas.

Recursos necesarios

- Tres baldes de 5 litros, uno para cada grupo.
- Tres palines, uno para cada grupo.
- Dos bolsas plásticas para vivero para cada grupo.
- Tres plásticos de 1,5 x1,5 m para cubrir las rebordas, uno para cada grupo.
- Si en el lugar de la práctica no hay un canal de riego o drenaje cercano para recoger agua, se debe tener un recipiente de 50 litros.
- Tres anillos de PVC o acero galvanizado de 5 cm de altura y 5 cm de diámetro para cada grupo.
- Un paquete de bolsas plásticas de 1 kg para guardar las muestras.
- Una balanza portátil para tomar el peso inicial de la muestra (Msh).
- Formato 1 para el registro de los pesos de las muestras y cálculo de las humedades a CC y PMP.
- 90 minutos para desarrollar la práctica, y 30 minutos para explicar los resultados y dar la información de retorno.

Instrucciones para los participantes

- Identifiquen en grupo los materiales de trabajo y su adecuado uso en el proceso, y reconozcan el área donde se realizará la actividad.
- Sigam el procedimiento suministrado por el facilitador de manera activa durante el desarrollo de la práctica.
- Registren los pasos críticos, señalando la causa de la dificultad y la manera en que la afrontaron para continuar con la actividad.

Formato 1. Registro de datos para la determinación de la humedad gravimétrica

Integrantes:								
Humedad a capacidad de campo (CC)								
Muestra	Profundidad (cm)	Φ anillo (cm)	Altura anillo (cm)	Msh (g) suelo + anillo	Msh (g)	Mss (g) suelo + anillo	Mss (g)	W _{CC} (%)
1								
2								
3								
Humedad del suelo a punto de marchitez permanente (PMP)								
Muestra	Profundidad (cm)	Φ anillo (cm)	Altura anillo (cm)	Msh (g) suelo + anillo	Msh (g)	Mss (g) suelo + anillo	Mss (g)	W _{PMP} (%)
1								
2								
3								
Ecuación: $W (\%) = \frac{Mw}{Mss} * 100 ; Mw = Msh - Mss$								

Retroalimentación del curso

Una vez se finalice el desarrollo del Formato 1, el facilitador abrirá un panel de discusión con los participantes, con el fin de analizar los conocimientos adquiridos. Para ello se recomienda realizar una serie de preguntas orientadoras, tales como las sugeridas a continuación:

¿Cómo les pareció la práctica?

¿Qué dificultades encontraron?

Generalmente se envían muestras de suelo para determinar estas humedades en laboratorios especializados. Por lo tanto, ¿consideran importante hacerlas en campo?

¿Cuál es la relevancia de registrar el diámetro y altura de los anillos donde se tomó la muestra? ¿Para qué se utiliza?

Ejercicio 1. Cálculo de parámetros para la programación del riego en el cultivo de palma: LARA, tiempo y frecuencia de riego

Objetivo

Con la adecuada realización de este ejercicio, los participantes estarán capacitados para integrar las variables de suelo, clima y cultivo, y definir cuándo y cuánto regar.

Orientaciones para el facilitador

- Solicite que se conformen nuevamente los mismos grupos de la práctica y que seleccionen un representante para exponer los resultados.
- Retome los datos calculados en la práctica 1 y explique a los participantes el objetivo. Solicíteles que

- tengan en cuenta los procedimientos indicados en la sesión teórica.
- Prepare el ejercicio de acuerdo con los resultados obtenidos en la práctica.
- Pase por cada grupo y entregue el formato para el cálculo de LARA, tiempo de riego y frecuencia de riego.
- Informe que tienen 60 minutos para realizar el ejercicio.
- Al terminar, pida a cada uno de los coordinadores de los grupos que expongan los resultados y conclusiones.
- Cuando finalicen las exposiciones pregunte a los participantes si el cálculo es acertado.
- Con el fin de contrastar los resultados y ampliar la discusión sobre este tema, obtenga previamente los datos de otro tipo de suelo.

Recursos necesarios

- Formato 2 para el cálculo de los parámetros para la programación de riego: LARA, tiempo y frecuencia de riego.
- Calculadora, lápiz y lapicero para cada uno de los grupos.
- Tablero o papelógrafo y marcadores de diferentes colores.
- Tablero o papelógrafo para plasmar el formato para el desarrollo del ejercicio final por parte de los grupos.

Instrucciones para el participante

Para el adecuado cumplimiento de la actividad y de los objetivos propuestos, por favor tenga en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Preste atención a las instrucciones del facilitador.
- Realice los cálculos con las ecuaciones presentadas por el facilitador.

- Evalúe y comente sus observaciones respecto a los cálculos realizados.
- Participe de la sección plenaria y aproveche este espacio para aclarar cualquier inquietud que durante la actividad no pudo ser solucionada.

Ejercicio 2. Caso ejemplo

En el lote donde los participantes determinaron la humedad gravimétrica a capacidad de campo y punto de marchitez permanente, el propietario requiere hacer un riego eficiente. Para ello, en el siguiente cuadro diligencie la información obtenida en la práctica.

Resultados práctica 1					
Muestra	Profundidad (cm)	Φ anillo (cm)	Altura anillo (cm)	W_{CC} (%)	W_{PMP} (%)
1					
2					
3					

Partiendo de estos resultados, conteste las siguientes preguntas:

¿Cuál es la lámina de agua rápidamente aprovechable (LARA) si se requiere efectuar un riego con factor de agotamiento (FA) del 50 %?

¿Cuál debería ser la frecuencia de riego si se conoce un uso consuntivo de 5 mmdía^{-1} para la etapa actual del cultivo de la palma de aceite?

Para el desarrollo de este ejercicio debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Se requiere determinar la densidad aparente en las mismas profundidades en que fueron tomadas la humedad a capacidad de campo y punto de marchitez permanente.
- La profundidad efectiva de raíces para el cultivo será de 60 cm.

Formato 2. Cálculo de los parámetros de riego

Integrantes:						
1. Determinación densidad aparente del suelo						
Muestra	Profundidad (cm)	Φ anillo (cm)	Altura anillo (cm)	Da (g/cm ³)	W _{CC} (%)	W _{PMP} (%)
1						
2						
3						
2. Determinación de las láminas de humedad a CC y PMP						
Muestra	Profundidad (cm)	Lam CC (mm)		Lam PMP (mm)		
1						
2						
3						
3. Determinación LARA, con un FA del 50 %						
Lam CC (mm)		Lam PMP (mm)		LARA (mm)		
4. Determinación frecuencia de riego (días)						

Información de retorno

Al finalizar, el facilitador hará una plenaria en la que enfocará la discusión hacia los siguientes aspectos:

- Describir las dificultades presentadas durante la realización de cada uno de los puntos del taller, e indicar las posibles soluciones que plantearon en ese momento. Para esto, el facilitador se puede apoyar en la información consignada (solución del ejercicio) en el tablero o papelógrafo.
- Enunciar las ventajas de conocer estos parámetros y su importancia.
- ¿Puede identificar aquellos parámetros que se requieren para realizar la evaluación de la eficiencia de un sistema de riego? ¿Cuál o cuáles, y por qué?

Bibliografía

- Alcántara, D. A. (2014). *Topografía y sus aplicaciones* (Primera ed.). México D.F., México: Grupo Patria Cultural.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M., (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guía para la determinación de los requerimientos de agua del cultivo, FAO. FAO, Rome, Italy.
- Alocén, J. (2007). Manual práctico para el diseño de sistemas de minirriego. Organización de Las Naciones Unidas para la Agricultura y la alimentación (FAO). Recuperado de: <http://www.fao.org/3/a-at787s.pdf>
- Angella, G., Frías, C., & Salgado, R. (2016). *Conceptos básicos de las relaciones agua-suelo-planta*. Buenos Aires, Argentina: Inta Ediciones.
- Bidwell, R. G. S. (1979). Transpiración. In *Fisiología Vegetal*. <http://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/fisiologia-vegetalbidwell.pdf>
- Brady, N.C. (1996). *The Nature and Properties of Soil*(Ninth ed.). New York, USA: Macmillan Publishing Company.
- Calvache, A. M. (2002). Manejo del agua: principios fundamentales. *Memorias del VIII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo*.
- CEM. (2006). *El sistema internacional de unidades SI* (Segunda ed.). Madrid, España: Centro Español de Metrología.
- CENAM. (2001). *El sistema internacional de unidades (SI)*. México: Centro Nacional de Metrología.
- Cenipalma. (2017). *Mejores prácticas agroindustriales del cultivo de la palma de aceite en Colombia*. Bogotá D.C., Colombia: Cenipalma.
- Corley, R.H.V.; Hong, T.K. (1981). 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. vol.2, p.343-35.
- Danielson, R.E., y P.L.M. Sutherland, (1986). Porosity, on Methods of Soil Analysis: Part I. Physical and Mineralogical Methods. Agronomy Monograph n. 9 (2nd ed.), pp. 443-461. Doi: <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c18>
- FAO. n.d. Estructura del Suelo. Recuperado a partir de http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s07.htm#top
- FAO. (n.d.). Levantamientos topográficos. Recuperado de: http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6707s/x6707s00.htm
- FAO. n.d. Textura del Suelo. Recuperado a partir de http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm#top
- FAO. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de agua de los cultivos*. En: Estudio FAO Riego y Drenaje.
- FAO. (2020). Propiedades físicas del suelo: Porosidad del suelo. Consultado en junio 2020. Retrieved from <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedadesfisicas/es/#:~:text=Porosidad%20del%20Suelo,y%2050%25%20de%20espacio%20poroso>.
- Fernández, R., Ávila, R., López, M., Gavilán, P., & Oyonarte, N. A. (2010). Manual de riego para agricultores: módulo 1. Fundamentos del Riego. Disponible en: https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/1337160941Fundamento_del_riego_1.pdf
- Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A. C. (n.d.). Agua para el planeta: ¿Cuánta agua hay en el planeta? Recuperado de: <https://agua.org.mx/en-el-planeta/>
- Forero, J. A. (2000). *Parámetros hidrodinámicos para riego*. Bogotá, D.C, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

- García, A., González, G., Maroto, A. L., Martínez, M. I., & Pilar, M. C. (2012). *Biología y Geología 1. Bachillerato* (Segunda ed). España: McGraw Hill.
- Gurovich, L. (2003). *Riego superficial tecnificado* (Segunda ed.). Bogotá: Alfaomega
- Hewitt, P. (2007). Física conceptual. Recuperado de: http://fq.iespm.es/documentos/lecturas/fisica_conceptual.pdf
- Huan, L; Kim, H; Chuah, JY; Ho Chai. (1994). Improving water management practices on oil palm through the water balance concept. In: International Planters Conference on Management for Enhanced Profitability in Plantations. Kuala Lumpur 1:101-119.
- IDEAM. (2015). *Atlas climatológico de Colombia*. Bogotá D.C., Colombia: IDEAM.
- IDEAM. (2019). *Estudio nacional del agua 2018*. Bogotá, D.C., Colombia: IDEAM.
- IGAC. (2018) ¿En qué consiste un levantamiento topográfico? Recuperado a partir de <https://www.igac.gov.co/es/contenido/en-que-consiste-un-levantamiento-topografico>.
- Jaramillo, D. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo* (Primera ed.). Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Junta de Andalucía. (n.d.). Conceptos básicos. Recuperado de: <http://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/21700290/helvia/aula/archivos/repositorio/0/34/html/unidades.html>
- León, M. J. (n.d.). Taquimetría: Curvas de nivel. Recuperado de: https://www.academia.edu/26161197/Curvas_de_nivel
- López, Y. (2000). Relaciones hídricas en el continuo agua-suelo-planta-atmósfera. Facultad de ciencias agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Sede Palmira (p. 90).
- Martin, E. C. (2010). *Métodos para medir la humedad del suelo para la programación del riego ¿Cuándo?*. Tukson, EE. UU: Universidad de Arizona.
- Mendoza, V. A., García, A. E., & Reich, D. P. (2014). *Física: Teoría, ejemplos y problemas*. México: Grupo Editorial Patria.
- Mercado, E. (1989). Requerimientos de agua de los cultivos y principios básicos de diseño. En: Curso sobre actualización en sistemas de riego. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Molina, D. L., & Torres, J. S. (2015). Caracterización y adecuación de suelos para el establecimiento del cultivo de la palma de aceite. Guía N° X Tecnologías para la agroindustria de la palma de aceite: guía para facilitadores. Bogotá, D.C., Colombia: Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite, Cenipalma.
- Pereira, L., Valero, J., & Picornell, R. (2010). El Riego Y Sus Tecnologías. Universidad de Castilla-La Mancha. España.
- Raffino, M. (2020). Concepto de “Presión”. Consultado en Junio 2020. Recuperado a partir de <https://concepto.de/presion-2/#ixzz6fZFtFua>.
- Rojas, R. M. (2007). Las Relaciones Agua Suelo Planta Atmósfera En Planificación, Diseño y Manejo de Proyectos de Aguas y Tierras, 8–12. Recuperado a partir de <http://www.ana.gob.pe:8093/media/16806/raspa.pdf>
- Torres, A. J. S. (1995).. Riegos. En: El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia (pp. 193-200). Cali: Cenicaña. Disponible en: https://www.cenicana.org/pdf_privado/documentos_no_seriados/libro_el_cultivo_cana/libro_p193-210.pdf
- Torres, J., Cruz, R. (1995). El cenirrómetro. Cenicaña. Serie divulgativa N° 3.
- Torres, J., Cruz, R., & Villegas, F. (2004). *Avances técnicos para la programación y el manejo del riego en caña de azúcar* (Segunda ed). Cali: Cenicaña.
- Tafur, H. (2005). *Conceptos básicos para el riego de los cultivos*. Palmira: Universidad Nacional de Colombia.
- Universidad de Caldas. (2011). *Modulo: edafología 1* (Primera ed.). Recuperado de: <https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/4776/edafologia.pdf>

- USDA. (1997). Irrigation Guide. Natural Resources Conservation Service. p. 754.
- USDA. (1999). Soil Quality Test Kit Guide. Recuperado de: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044790.pdf
- Walker, W. R. (1989). Guidelines for designing and evaluating surface irrigation systems (First ed.) Recuperado de: <http://www.fao.org/docrep/T0231E/t0231e00.htm#Contents>
- Wilson, J., & Buffa, A. (2002). Física (Quinta ed.). Recuperado de: <https://books.google.com.co/books?id=KFEvYPsc5IMC&printsec=frontcover&dq=volumen+magnitud+tres+dimensiones.pdf&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiRxNLDgdjoAhUHUt8KHQbFAhwQ6AEIdzAJ#v=onepage&q&f=false>
- WWF. (2005). Curso de riego para agricultores. Proyecto de autogestión del agua en la agricultura. Global Water Partnership.



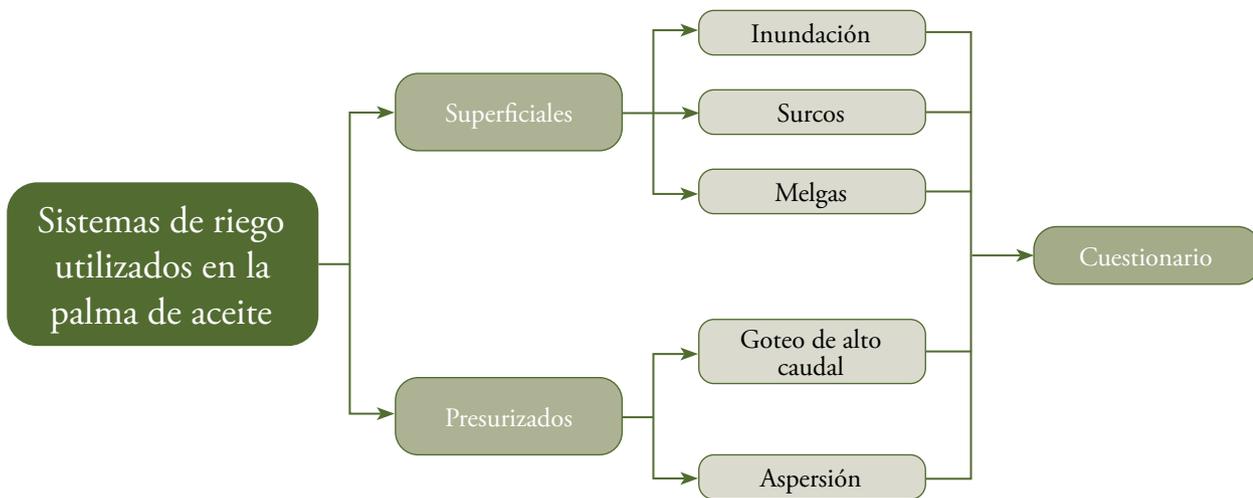
Unidad de aprendizaje 2. Descripción de los sistemas de riego utilizados en el cultivo de palma

Estructura de aprendizaje de la unidad	61
Explicación de la estructura	61
Preguntas orientadoras	61
Objetivos.....	61
Introducción	62
2.1 Sistemas de riego	62
Ejercicio 3. Seleccionemos el sistema de riego más apropiado, considerando las condiciones de clima, suelo, cultivo y costos	68
Bibliografía.....	69



Sistema de riego por aspersión. Fuente: Julián Monroy

Estructura de aprendizaje de la unidad



Explicación de la estructura

En esta unidad se abordará el conocimiento sobre los diferentes sistemas de riego utilizados en el cultivo de palma de aceite. Inicialmente se discutirán las diferencias entre un sistema de riego superficial y otro presurizado, considerando sus características y clasificación. Luego, se procederá con la descripción de los más usados en el cultivo de palma, indicando los requerimientos para su instalación en campo y sus ventajas y desventajas.

Preguntas orientadoras

A continuación, se formularán algunas preguntas con el fin de indagar el conocimiento de los participantes sobre los diferentes sistemas de riegos, y se dirigirá la socialización de sus experiencias en condiciones de plantación. En ningún caso se pretende evaluar, simplemente es un sondeo que permitirá enfocarse en las falencias y dudas que se generen.

¿Qué es un sistema de riego y cuál es su objetivo?

¿Cuál o cuáles son las diferencias entre un sistema de riego superficial y presurizado?

¿Podría describir las características de los métodos de riego usados en su plantación?

¿Cómo cree que influyen las condiciones de suelo, topografía y disponibilidad de agua en la selección de los métodos de riego?

Objetivos

Al terminar el contenido de esta unidad de aprendizaje, el participante estará en capacidad de:

- Establecer las diferencias entre los sistemas de riego superficial y presurizado, y sus respectivas características.
- Identificar los factores asociados con la toma de decisiones para la selección de los métodos de riego.

- Conocer las características de los sistemas de riego más usados en el cultivo de la palma de aceite.
- Determinar el método de riego más apropiado, considerando las condiciones atmosféricas, los factores de suelo, cultivo y costos.

Introducción

El riego agrícola puede definirse como una práctica que tiene por objetivo la aplicación oportuna y uniforme de agua a un perfil del suelo, para reponer en este el agua consumida por los cultivos. Por lo tanto, su diseño, planificación y operación varían considerablemente según las áreas. La selección del método más apropiado resulta de la combinación, no solo de las condiciones estudiadas en la Unidad 1 (suelo, clima, cultivos y disponibilidad de agua), sino también de los componentes de cada sistema de riego y de las relaciones que entre ellos se establecen para el adecuado desarrollo y producción de los cultivos, además de su costo.

En esta unidad de aprendizaje se profundizará en los métodos de riego más usados en el cultivo de la palma de aceite, y la identificación de los diferentes factores que influyen en su eficiencia. Comienza con los referentes teóricos antes mencionados, que serán complementados con un cuestionario que permitirá afianzar el conocimiento sobre el tema.

2.1 Sistemas de riego

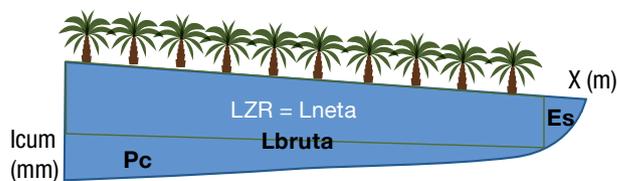
Los sistemas de riego engloban las diferentes formas que existen de aplicar el agua al suelo. Se seleccionan de acuerdo con la topografía del terreno, características físicas y tipo del cultivo, disponibilidad de agua, calidad del agua de riego, mano de obra, costo de la instalación y efecto en el medioambiente (Fernández *et al.*, 2010). A lo largo de la historia estos sistemas se han ido diversificando. Hoy se encuentran muchos modelos con diversas variaciones, que pueden agruparse bajo dos denominaciones: superficiales y presurizados. A continuación, se presentan de manera general sus características, y se detallan aquellos que han sido utilizados en el cultivo de la palma de aceite.

Generalmente, los componentes que integran los sistemas de riego son (Cisneros, 2003):

- Fuente de agua (ríos, reservorios, pozos, etc.).
- Toma de agua de cabecera.
- Canal principal o tubería.
- Canales o tuberías de distribución (principal, secundarios, terciarios).
- Red de drenaje para evacuar los excesos de agua.
- Estructuras hidráulicas (válvulas, compuertas, medidores, aliviadores, etc.).
- Instalaciones adecuadas de cada método de riego.

2.1.1 Sistemas de riego por superficie

Tienen la característica común de que el agua se aplica en la superficie del suelo y se distribuye en el campo por gravedad, de modo que el caudal de riego disminuye a lo largo del campo debido a la infiltración del terreno. Dentro de sus ventajas está el bajo costo por no requerir grandes equipos o estructuras para regar y bombear el agua (Faci & Playan, 2000). En estos métodos se presentan eficiencias bajas de aplicación, debido a que se producen pérdidas considerables de agua por percolación profunda (**Pc**) y/o por escurrimiento superficial (**Es**) (Figura 19) (Gurovich, 2003).



Notas: LZR= lámina en zona de raíces. Es= escurrimiento. Pc= percolación profunda. Lneta= lámina neta. Lbruta= lámina bruta

Figura 19. Perfil de comportamiento del agua en un riego por superficie

Existen varios sistemas para regar por superficie. Entre los más usados en el cultivo de palma de aceite están el riego por inundación, surcos anchos y melgas.

2.1.1.1 Riego por inundación

Es una de las formas más antiguas de riego y ampliamente usado en las plantaciones de palma de aceite. Consiste en la construcción de canales de riego en las partes altas de los lotes, desde donde se permite un desbordamiento hacia las zonas bajas a manera de inundación. Dada esta forma de aplicación de agua, su distribución dentro de los lotes no es uniforme, por lo que para algunas plantas la cantidad de agua disponible es mínima o nula y para otras excesiva (Figura 20). Esto hace que sea generalmente el más ineficiente, y se presenten grandes pérdidas de agua (Demin, 2014; Silva, J., & Álvarez, M., 2016). Para reducirlas, se recomienda que previo a la implementación del riego se realice una nivelación del terreno y así ajustar las pendientes que se necesitan para el desplazamiento del agua sobre el lote (Acuña, 2014).



Figura 20. Riego por inundación. Fuente: Cenipalma (2006)

En el cultivo de palma de aceite, se estima que su costo de instalación es de aproximadamente \$ 600.000 por hectárea, que incluye la construcción del canal principal y secundarios, y recorredoras de riego. El costo de operación oscila entre \$ 200.000 y \$ 300.000 por hectárea.

2.1.1.2 Riego por surcos

Consiste en la construcción de bordas de tierra de cerca de 30 cm de alto, que generan espacios de recorrido de agua (superiores a 50 cm) conocidos como surcos (Figura 21), y que favorecen el movimiento del agua en el sentido de la pendiente del terreno que no debe exceder el 2 % (Booher, 1974) para disminuir el tiempo de avance y favorecer la infiltración.

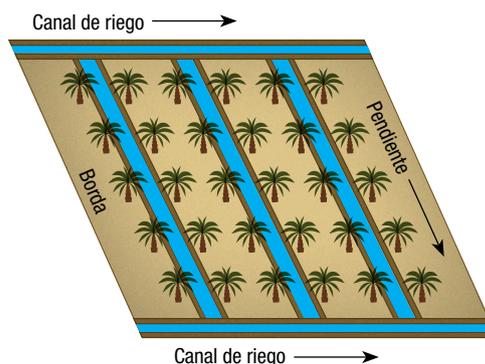


Figura 21. Riego por surcos. Fuente: Cenipalma (2006)

Según Cisneros (2003), este método de riego puede ser usado en cualquier tipo de suelo, con excepción de los arenosos, pues en estos las infiltraciones de agua son muy altas y dificultan la distribución lateralmente. Otro aspecto relevante a tener en cuenta para su diseño, es la separación que debe haber entre cada surco, ya que debe asegurarse el humedecimiento de la zona de raíces. En el cultivo de la palma de aceite generalmente están separados a 6 m y tienen un ancho de 3 m. Adicionalmente, Brown (2000) citado por Méndez *et al.* (2016), menciona que una de las principales dificultades que afectan el adecuado funcionamiento de este sistema, es la deficiencia en su diseño y manejo.

En los últimos años, ha sido implementado ampliamente en el cultivo de palma de aceite, como alternativa al de inundación, dado que las eficiencias de aplicación de agua son mejores (30-50 % con un apropiado diseño e implementación). El costo de instalación oscila entre \$ 800.000 y \$ 1.500.000 por hectárea, sin incluir valores de nivelación del terreno. Los costos de operación si la captación de agua se realiza por superficie, están entre \$ 300.000 y \$ 400.000, y si es por bombeo entre \$ 500.000 y \$ 700.000 por hectárea. Estos valores varían dependiendo del costo de energía, de concesión y mano de obra.

2.1.1.3 Riego por melgas

Consiste en la construcción de franjas que quedan entre dos bordas, para permitir que el agua avance por este espacio de suelo desde la cabecera hasta el pie del lote (Figura 22).

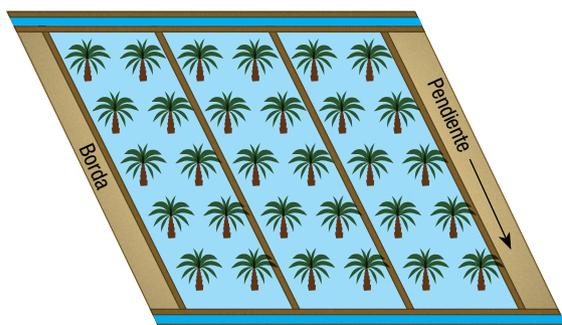


Figura 22. Riego por melgas. Fuente: Cenipalma (2006)

Al igual que en el riego por surcos, para este método se recomienda que la pendiente a lo largo de la melga no sea mayor al 0,1 %. Así, se evita la erosión, el agua avanza homogéneamente y se facilita su infiltración en el suelo. Dentro de las desventajas está que requiere de una gran cantidad de agua y de un suelo bien nivelado (Demin, 2014).

En el cultivo de la palma de aceite, sus costos de instalación y operación son similares a los detallados anteriormente para el riego por surcos anchos.

2.1.1.4. Riego compuertas o ventanas

Es uno de los sistemas de mayor eficiencia entre las técnicas de riego por gravedad. Permite distribuir el agua por medio de tomas para hidrantes o tuberías de PVC conectadas a la fuente de abastecimiento. Cuando se requiere regar un lote, al hidrante se conecta la tubería de PVC (normalmente de 8" y 10", y 9 metros de longitud) que está equipada con pequeñas compuertas o ventanas que regulan el flujo de agua, entregado sobre surcos o melgas (Figura 23). Esto hace que se reduzcan al mínimo las pérdidas por conducción, y por tanto mejora la eficiencia del sistema. Adicionalmente, este método se caracteriza por ser de baja presión; en la tubería se presentan presiones cercanas a 1 mca (1.423 psi).

Los tubos de PVC pueden ser móviles y de compuertas adheribles, las cuales son ajustables de acuerdo con el caudal que se desee entregar en cada melga o surco. Para el cultivo de la palma de aceite, por lo general se utilizan tuberías de compuertas que descargan entre 2 y 5 L/s con una presión de 1,5 psi. El caudal se ajusta

dependiendo de las condiciones del terreno (textura y la pendiente de las melgas) para evitar la erosión del suelo.

Para conducir por gravedad el agua que sale de las compuertas hasta las palmas, se construyen por la calle de la palera a cada lado, caballones, surcos o canales cerca de la línea de palmas. La eficiencia de aplicación depende principalmente de la velocidad de avance del agua, que a su vez está condicionada por la topografía, tipo de suelo, caudal utilizado, conformación del surco y la profundidad de las raíces del cultivo (Calderón, 2014).

Se estima que el costo de instalación oscila entre \$ 3.700.000 y \$ 4.900.000 por hectárea (PalmaSana, 2019). Debido al aumento en el requerimiento de personal para el movimiento de las tuberías de compuertas, el valor de operación se incrementa. En el caso del Campo Experimental Palmar de la Sierra, localizado en la Zona Norte, en el 2018 el costo total fue de \$ 2.278.749 por hectárea. Por otro lado, en los Llanos Orientales, Monrroy (2010) menciona que el costo operativo para el 2010, estuvo alrededor de \$ 450.000 por hectárea.



Figura 23. Riego por compuertas en palma de aceite

2.1.2 Sistemas de riego presurizados

En estos, el agua se conduce a presión por tuberías y laterales de riego hasta las plantas, donde es distribuida desde emisores en forma de gotas (goteo) o de fina lluvia (aspersión). Dentro de sus ventajas se encuentra la alta eficiencia de aplicación, no requiere de nivelación del terreno y pueden utilizarse para administrar fertilizantes (fertirrigación). Por otro lado, debido a su

alto nivel tecnológico demandan para su correcto funcionamiento y manejo personal capacitado, y el costo de inversión es mayor a uno superficial (INTA, 2013).

El sistema de riego presurizado consta de un punto de bombeo que constituye una bomba para extraer agua, impulsarla y darle presión a la tubería. Además, un mecanismo de filtrado, uno de conducción y distribución del agua para el cultivo mediante tuberías, y uno de inyección de fertilizante si se realiza fertirriego. Entre todos estos elementos existen válvulas de distintos tipos (Demin, 2014).

A continuación, se presentan los más utilizados en el cultivo de palma.

2.1.2.1 Riego por goteo

Realiza la aplicación de agua en forma de gotas de manera continua en un lugar próximo a la planta, humedeciendo solo parte del volumen de suelo, el cual tiene la mayor concentración de raíces. Esta zona se denomina bulbo de humedecimiento y está condicionada principalmente por la textura del suelo (Figura 24). Este método también se conoce como riego localizado o de alta frecuencia, pues puede aplicar el agua diariamente, dependiendo el tipo de suelo y las necesidades de los cultivos.

El sistema de riego por goteo se puede establecer en cualquier tipo de suelo y clima. Su principal ventaja es la disminución significativa del volumen de agua usado debido a su alta eficiencia (cerca al 90 %). Aunque inicialmente la inversión es alta, se compensa con los incrementos en la producción del cultivo.

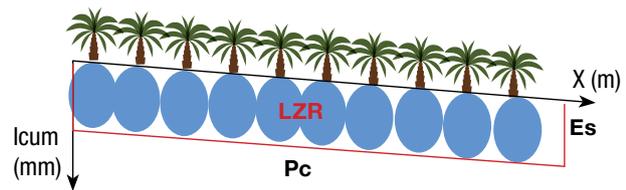


Figura 24. Esquema general del patrón del bulbo de humedecimiento en un sistema de riego por goteo. Notas: LZR= lámina en zona de raíces. Es= escorrentía. Pc= ercolación profunda

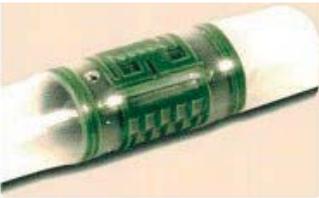
Las desventajas son que requiere buena calidad del agua para evitar obstrucciones en los goteros, sistemas de filtrado y mantenimiento frecuente.

De acuerdo con INTA (2013), sus componentes son:

- Fuente de abastecimiento de agua.
- Cabezal principal: equipo de bombeo, aparatos de control y medición (medidor de volúmenes y presiones), sistema de filtrado y unidad de fertilización (para el caso de fertirriego).
- Tubería de conducción principal.
- Cabezal de campo: válvulas que permiten suministrar el agua a las diferentes unidades de riego.
- Tuberías o mangueras terciarias.
- Laterales de riego con emisores.

Respecto a los emisores para este sistema, en la Tabla 11 se presenta su clasificación (INTA, 2013):

Tabla 11. Tipos de emisores utilizados en sistemas de riego por goteo

Goteros		Cintas
De laberinto	Tipo vortex (botón)	
		

Fuente: INTA (2013)

Las características de estos emisores es que disipan la presión que existe en la red de tuberías, por medio de un orificio de diámetro pequeño o por un laberinto. De esta manera permiten descargar hacia el suelo solamente unos pocos litros por hora.

Debido al requerimiento hídrico del cultivo de palma de aceite, el caudal que se necesita de los emisores es más alto que el de un gotero normal, que entrega entre 1 y 16 l/h. Por lo general, las plantaciones que riegan con este sistema usan goteros compensados y no compensados con caudal de entrega entre 40 y 60 l/h, por lo que se le denomina goteo de alto caudal (Figura 25).



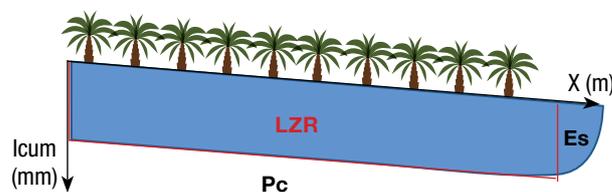
Figura 25. Ejemplo de gotero utilizado para el riego en el cultivo de palma de aceite. (Fuente: NaanDanJain)

La inversión para su instalación oscila entre los \$ 5.700.000 y \$ 9.000.000, y los costos de operación entre \$ 1.100.000 hasta \$ 1.700.000 (PalmaSana, 2019; Valderrama *et al.*, 2018). La variación de estos de operación depende del valor del agua, energía y mano de obra.

2.1.2.2 Aspersión

En este método, el agua se aplica mediante aspersores que simulan una lluvia natural (Figura 26a). Requiere de una red hidráulica de tuberías (PVC, metal) o mangueras plásticas o de polietileno para el paso de agua a presión, antes de ser entregada al cultivo por los aspersores. Igualmente, necesita de una adecuada presión para el funcionamiento óptimo de los aspersores (Ministerio de Medio Ambiente y Agua,

2002), que se obtiene por medio de una bomba o aprovechando cargas debidas a diferencias de nivel (Gurovich, 2003).



Notas: LZR= lámina en zona de raíces. Es= escorrentía. Pc= percolación profunda

Figura 26. a) Riego por aspersión en palma de aceite **b)** Esquema del comportamiento del riego en sistemas de riego por aspersión

Debido al eficiente control en la aplicación del agua, es posible usarlo en una amplia gama de suelos, incluso en aquellos que no pueden ser regados de manera adecuada y eficiente por métodos superficiales, como por ejemplo los arenosos o con pendientes pronunciadas. Con este sistema se obtienen eficiencias entre el 70 % y el 80 %, donde las pérdidas se pueden dar debido a la evaporación, principalmente en zonas muy secas y con vientos moderados o fuertes.

Además de estas ventajas, Gurovich (2003) destaca uniformidad en la infiltración del agua en el perfil del suelo (Figura 26b), permite realizar fertirriego, los costos de preparación de suelos disminuyen y se economiza en mano de obra.

Dentro las limitaciones, se menciona su costo inicial relativamente alto, y que el viento puede distorsionar la distribución del agua en el suelo creando condiciones favorables para el desarrollo de enfermedades fungosas. Los aspersores en algunas zonas son muy susceptibles al robo y es por ello que en la Zona Norte, se ha venido implementando modificaciones al sistema a través del uso de taponés en vez de los aspersores. También se pueden presentar daños por el paso de maquinaria agrícola.

De acuerdo con Peña (2012), este sistema está compuesto principalmente por:

- Aspersores
- Tuberías
- Sección de riego
- Equipos y accesorios hidráulicos
- Sistema de bombeo

De manera similar al riego por goteo, sus costos de instalación en el cultivo de la palma están entre \$ 5.600.000 y \$ 8.900.000 (PalmaSana, 2019), y los de operación entre \$ 1.000.000 y \$ 1.200.000 (PalmaSana, 2019; Valderrama *et al.*, 2018). La variación de estos últimos depende del valor del agua, energía y mano de obra.

Selección de sistemas de riego

Ya se han descrito las principales características de algunos sistemas de riego, así como sus ventajas y desventajas. Teniendo en cuenta esto, se puede evidenciar que se requieren diversos factores (técnicos, sociales y económicos) para la selección de uno u otro método. En la Tabla 12 se resumen algunos de ellos, basándose en las propuestas de Hargreaves y Merkle (2000) y Gurovich (2003).

Tabla 12. Métodos de riego más utilizados en el cultivo de palma de aceite

Método de riego		Factores técnicos	Factores sociales	Factores económicos
Superficiales o gravedad	Inundación	<ul style="list-style-type: none"> • Presenta una baja eficiencia de aplicación, por lo que requiere de altos volúmenes de agua para garantizar las necesidades de los cultivos. • Puede establecerse en suelos de texturas finas y medias (FAr hasta FA). 	Muchos agricultores lo usan por tradición y por la baja inversión inicial.	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere mano de obra. • Inversión inicial baja.
	Melgas	<ul style="list-style-type: none"> • Necesitan nivelación para manejar pendientes < 1 % o preferiblemente al 0,2 %. • Puede establecerse en suelos de texturas finas y medias (FAr hasta FA). 	Algunos agricultores no realizan preparación del suelo.	<ul style="list-style-type: none"> • Mano de obra requerida es baja. • Requiere costos de nivelación.
	Surcos anchos	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere de pendientes uniformes menores del 2 % para obtener una buena distribución y penetración del agua, principalmente para suelos con bajas infiltraciones. • Puede usarse en todos los suelos si se ajusta la longitud de los surcos al tipo de terreno. 	Desconocimiento de los requerimientos de preparación del suelo para su establecimiento.	<ul style="list-style-type: none"> • Inversión inicial baja. • Para lograr la distribución uniforme del agua en el surco se necesita mano de obra.

Continúa

Método de riego		Factores técnicos	Factores sociales	Factores económicos
Presurizados	Goteo	<ul style="list-style-type: none"> No requiere nivelación, pues se ajusta a cualquier pendiente. Alta eficiencia (90%), por lo tanto, hay mínimas pérdidas de agua. Puede establecerse en todo tipo de suelo. Precisa de un sistema de filtrado. 	Desconocimiento de las ventajas y ahorros en uso del agua.	<ul style="list-style-type: none"> Requiere de una inversión alta. Mayores costos de mantenimiento.
	Aspersión	<ul style="list-style-type: none"> No requiere nivelación, ya que se ajusta a cualquier pendiente. Es posible establecerlo en todo tipo de suelo. Eficiencias hasta del 75 %, lo que permite un ahorro en el uso del agua. Puede crear condiciones favorables para el desarrollo de enfermedades fungosas. 	Desconocimiento de las ventajas y ahorros en uso del agua.	<ul style="list-style-type: none"> Precisa de una inversión alta. Bajos costos de operación.

Ejercicio 3. Seleccionemos el sistema de riego más apropiado, considerando las condiciones de clima, suelo, cultivo y costos

Objetivo

Al finalizar el ejercicio, los participantes estarán en capacidad de identificar las diferentes características de los sistemas de riego superficiales y presurizados usados en el cultivo de palma de aceite, y los factores requeridos para su selección en un área específica.

Orientaciones para el facilitador

Para garantizar el éxito, se sugiere al facilitador tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Explique el objetivo del ejercicio a los participantes.
- Conforme grupos de trabajo de tres personas para realizar la actividad.
- Cuente con tres estudios de caso, en los que se presentan diferentes características de suelo, topografía y clima. Puede hacer uso de fotografías para explicar paso a paso cada situación. Se requiere que cada grupo analice y seleccione el sistema de riego más apropiado para cada condición.

- Entregue aleatoriamente un estudio de caso por grupo y brinde una explicación de este, cerciorándose de que lo hayan entendido.
- Informe que disponen de una hora para hacer el ejercicio, y que estará disponible para solucionar las inquietudes que surjan durante el desarrollo de la actividad.
- Coordine la evaluación del ejercicio con los participantes. Se sugiere que cada grupo seleccione un representante para que exponga la solución del estudio de caso que le correspondió. Al final se sacarán las conclusiones de la actividad.

Recursos necesarios

- Estudio de caso y cuestionario.
- Lápiz, tajalápiz y borrador.

Instrucciones para el participante

Los participantes deberán estar atentos a las indicaciones del facilitador. Al finalizar la solución del ejercicio de caso, deberán exponer sus inquietudes sobre el tema tratado con el grupo. Dispondrán de una hora para el desarrollo de la actividad y otra para la socialización de los resultados.

Caso 1	Caso 2	Caso 3
Zona: Norte (Codazzi)	Zona: Norte (Zona Bananera)	Zona: Norte (El Copey)
Área: 50 ha Cultivar: <i>Elaeis guineensis</i> , Deli x Avros Edad cultivo: 15 años ETc: 7 mm/día Pendiente del terreno: 1 % Fuente de agua: río a 2 km	Área: 50 ha Cultivo: OxG, Coari x La Mé Edad cultivo: tres años ETc: 5 mm/día Pendiente del terreno 2 % Fuente de agua: río a 500 m	Área: 50 ha Cultivo: <i>Elaeis guineensis</i> , Deli x Ghana Edad: siete años ETc: 6 mm/día Pendiente del terreno 2 % Fuente de agua: río a 3 km
Características del suelo:	Características del suelo:	Características del suelo:
Textura: arenoso CC (%): 10 (gravimétrico) PMP (%): 5 (gravimétrico) Da: 1,5 g/cm ³ Ib: 5 cm/h	Textura: franco arcilloso CC (%): 36 (gravimétrico) PMP (%): 22 (gravimétrico) Da: 1,3 g/cm ³ Ib: 2,5 cm/h	Textura: franco arcilloso limoso CC (%): 38 (gravimétrico) PMP (%): 22 (gravimétrico) Da: 1,4 g/cm ³ Ib: 2 cm/h
<ul style="list-style-type: none"> Identifique el método de riego más apropiado para las condiciones dadas en cada caso. Explique los criterios utilizados para la selección del sistema de riego. 		

Información de retorno del ejercicio

El facilitador invitará a los líderes de cada grupo para que expongan a los demás, los criterios que tuvieron en cuenta para la selección del método de riego en el estudio de caso que les correspondió. Esto permitirá que se identifiquen los aspectos relevantes del tema, se manifiesten las inquietudes y se afiancen los conocimientos adquiridos. Al finalizar la presentación, se recomienda realizar las siguientes preguntas orientadoras:

¿Qué aspectos de los estudiados en esta unidad, son importantes para el conocimiento de los diferentes sistemas de riego?

¿Conoce otros métodos de riego que se utilicen en el cultivo de palma? ¿Cuáles?

¿Considera que el ejercicio le aporta a un mejor entendimiento sobre la selección y manejo de sistemas de riego en su cultivo?

Bibliografía

- Acuña, C. G. (2014). Diseño de un sistema integrado de riego superficial (surcos, melgas y cuadros) en el terreno designado como área experimental de la Escuela de Ingeniería Agrícola del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago. Recuperado de: https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/5811/sistema_riego_superficial_experimental.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Brown, O. (2000). Aplicación de la ecuación de balance de volumen en el diseño y evaluación del riego por surcos. "Tesis de Maestría en Ingeniería de Riego y Drenaje. Centro de Estudios Hidrotécnicos. Universidad de Ciego de Ávila, Cuba.
- Booher, L.J. (1974). El Riego Superficial. FAO n° 95. Roma.
- Calderón, G. (2014). Proyecto de riego en el Campo Experimental Palmar de la Sierra (Hacienda Alquería 2): Riego por compuertas. Zona Bananera, Magdalena. 29p

- Cisneros, R. (2003). Apuntes de la materia Riego y Drenaje. Universidad Autónoma de San Luis de Potosí. Recuperado de: <http://www.ingenieria.uaslp.mx/Documents/Apuntes/Riego y Drenaje.pdf>
- Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite. (2019). Uso eficiente del agua: reto de palmicultores para afrontar consecuencias del cambio climático. Periódico PalmaSana. *Periódico PalmaSana*, (27), 1-8.
- Demin, P. (2014). Métodos de riego: fundamentos, usos y adaptaciones. Aporte para el mejoramiento del manejo de los sistemas de riego. Recuperado de: https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_aportes_para_el_mejoramiento_del_manejo_de_los_sistemas_de_riego.pdf
- Faci, J. M., & Playan, E. (2000). Principios básicos del riego por superficie. MAPA, Madrid. 1, 32p.
- Faci, J. M., & Playan, E. (2000). Principios básicos del riego por superficie. *Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentacion*, 1, 32.
- Fernández, R., Ávila, R., López, M., Gavilán, P., & Oyonarte Gutiérrez, N. A. (2010). *Manual de riego para agricultores: módulo 1. Fundamentos del Riego*. Sevilla, España: Consejería de Agricultura y Pesca
- Gurovich, L. (2003). *Riego superficial tecnificado* (Segunda ed.). Bogota: Alfaomega
- Hargreaves, G.H. & Merkle G.P. (2000). Fundamentos del Riego. Water Resources Publications, LLC. U.S.A.
- Heras, R. (1981). Manual de ingeniería de regadíos. MOPU.
- INTA. (2013). *Riego por goteo en olivo*. Recuperado de: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-_hoja_informativa_riego_por_goteo_olivo-_julio_.pdf
- Mahecha, J., & Saldarriaga, J. (2005). Factibilidad técnica y económica de riego a presión por compuerta en cultivos de palma africana. Departamento de ingeniería civil y ambiental. Universidad de los Andes. Bogotá. 73p. Recuperado a partir de <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/22200/u262247.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Méndez J., Brown M., Palmero E., & Mundiel D. (2016). Evaluación hidráulica de sistemas de riego con tuberías multicompuertas para el riego de la caña de azúcar en la agricultura. *Universidad y Ciencia*, 9(14), 52–81. <https://doi.org/10.5377/uyc.v9i14.4561>
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (2002). *Cartilla 7. Uso eficiente del agua en agricultura*. Recuperado de: <https://docplayer.es/49963706-Cartilla-7-uso-eficiente-del-agua-en-agricultura.html>
- Monroy, J. J. (2010). Sistema de riego por superficie mediante el método de tubería de ventanas en palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq). Marco de La IX Reunion Técnica Nacional. Cenipalma, 31(4), 36–44.
- Peña, E. (2012). *El riego por aspersión: enfoques agronómico, estadístico, hidráulico y económico*. Jiutepec, México: IMTA.
- Silva, J., & Álvarez, M. (2016). Criterios y bases técnicas para el manejo integrado del agua-riego y drenaje-II parte. LA PALMA. Boletín Técnico GREPALMA, 3, 1-11.
- Valderrama, M., Mosquera, M., Castro, L., Ruiz, E., López, F., González, M., & Fontanilla, A. (2018). Actualización de costos de producción para el fruto de palma de aceite y el aceite de palma en 2018: estimación en un grupo de palmicultores colombianos. Cenipalma y Fedepalma.
- Walker, W. R. and Skogerboe, G. V. (1987). Surface irrigation “theory and practice”. Prentice-Hall, Inc. Utah State University. Logan, UT, USA. 386 p.



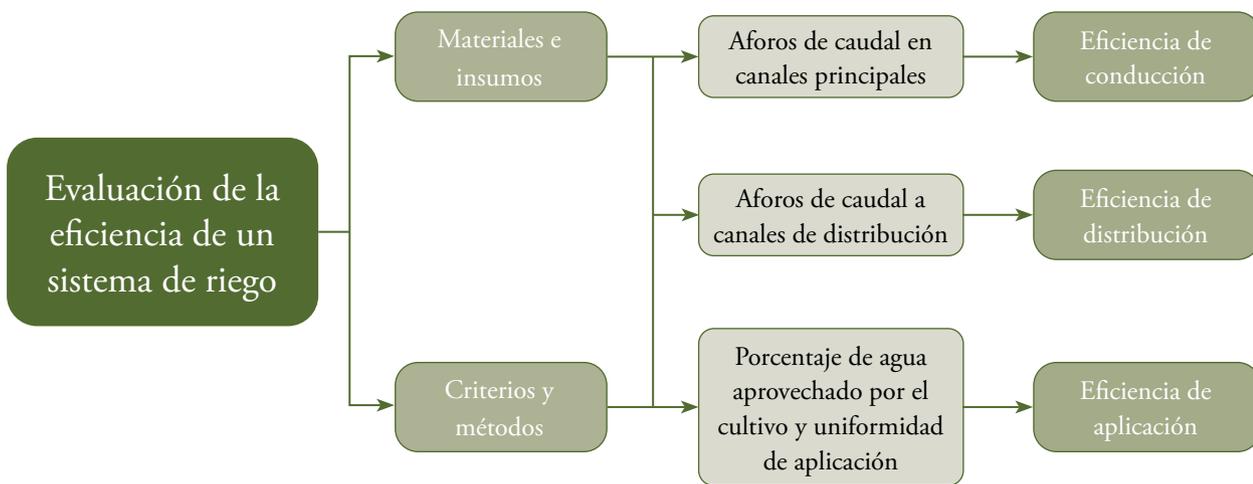
Unidad de aprendizaje 3. Descripción de los métodos de evaluación de la eficiencia de los sistemas de riego por superficie y presurizados

Estructura de aprendizaje de la unidad	73
Explicación de la estructura	73
Preguntas orientadoras	73
Objetivos.....	73
Introducción	74
3.1 Eficiencias del sistema de riego	74
3.2 Medición del caudal (aforos)	74
3.3 Eficiencia de conducción	79
3.4 Eficiencia de distribución	79
Práctica 2. Determinemos la eficiencia de conducción en un canal de riego	80
3.5 Eficiencia de aplicación	83
Práctica 3. Determinemos el desempeño de un sistema de riego por surcos	86
Ejercicio 4. Problema tomado de la FAO (Walker, 1989)	89
Práctica 4. Determinemos la eficiencia de uniformidad de un sistema de riego por aspersión.....	93
Bibliografía.....	96
Anexo 1. Material de apoyo Aforo en canales abiertos por el método del flotador ..	97
Anexo 2. Material de apoyo para la evaluación de desempeño del sistema de riego por surcos.....	99
Anexo 3. Material de apoyo para la evaluación de la eficiencia de uniformidad de un sistema de riego por aspersión.....	103



Aforador o canaleta RBC en el fondo del canal de drenaje para la medición del caudal.

Estructura de aprendizaje de la unidad



Explicación de la estructura

En esta unidad de aprendizaje se abordarán los fundamentos para evaluar la eficiencia de un sistema de riego, partiendo con la explicación de los diferentes criterios y métodos para realizar esta labor, así como los materiales e insumos requeridos. Se hace distinción y se describe cada una de las eficiencias: de conducción, de distribución y de aplicación, y se complementa con los temas relacionados sobre el aforo de caudales en canales abiertos, ya que es una actividad necesaria dentro del proceso para la estimación de la eficiencia.

Teniendo en cuenta lo anterior, se destaca que el propósito de esta unidad es brindar las herramientas necesarias para evaluar el desempeño de los sistemas de riego.

Preguntas orientadoras

Por medio de una serie de preguntas, el facilitador podrá identificar el nivel de conocimiento que tienen los

participantes sobre el tema y, al mismo tiempo, introducirlos al contenido.

¿Qué es la eficiencia de riego?

¿Conoce los componentes de la eficiencia de riego?

¿Cuáles son?

¿Cuál es la importancia de evaluar la eficiencia de un sistema de riego?

¿Ha medido la eficiencia de conducción en los canales principales de riego en su plantación? Si lo hace, ¿qué método utiliza?

¿Ha evaluado la eficiencia de los sistemas de riego en su plantación? ¿Podría describir brevemente cómo lo hace?

Objetivos

Al terminar esta unidad los participantes estarán en capacidad de:

- Establecer las pérdidas por conducción en canales principales y secundarios de riego, mediante diferentes metodologías de aforo.
- Determinar la lámina o volumen aplicado por un sistema de riego y su uniformidad.
- Estimar la eficiencia de aplicación de los diferentes sistemas de riego por superficie y presurizados, usados en el cultivo de palma de aceite.
- Evaluar la operación efectiva de un sistema de riego, e identificar alternativas para su mejoramiento.

Introducción

La eficiencia de riego implica el manejo adecuado del agua en las plantaciones, de tal manera que alcancen las producciones potenciales de sus cultivos haciendo mínimas las pérdidas de agua. Para ello, se requiere de la implementación y manejo de sistemas de riego y drenaje apropiados. Sin embargo, la realidad es que muchos de estos han sido instalados sin un debido diseño y no son operados correctamente. Es imprescindible evaluar su desempeño para poder determinar estrategias de operación más económicas y eficientes, que signifiquen no solo un ahorro en el uso del agua, sino también en la mano de obra y en energía.

La evaluación de los diferentes métodos de riego corresponde al análisis de su funcionamiento, basado en mediciones de campo bajo las condiciones y prácticas usadas normalmente por el productor. También incluye el estudio de posibles modificaciones al sistema, si este lo requiere. Dentro de los factores que se pueden identificar para la valoración están el caudal de entrada, la uniformidad de aplicación e infiltración en cada riego, duración de la aplicación, pérdidas por percolación o escurrimiento, entre otros.

Por lo tanto, en esta unidad se profundizará en los temas relacionados con las metodologías para la evaluación de la eficiencia de los diferentes métodos de riego, y la identificación de los criterios necesarios para llevar a cabo estos estudios. Comienza con los referentes teóricos antes mencionados, que serán complementados con prácticas de campo y talleres que permitan afianzar el conocimiento sobre la materia.

3.1 Eficiencias del sistema de riego

El riego eficiente debe permitir un almacenamiento de agua uniforme en el perfil del suelo, de tal manera que supla los requerimientos de las plantas, sin someterlas a excesos o déficit de humedad (Gurovich, 2003). En otras palabras, la eficiencia de riego se puede expresar como la relación entre el volumen de agua efectivamente utilizado por las plantas, y el volumen de agua empleado para regarlas. Generalmente, un sistema de riego se considera eficiente cuando el agua aplicada al cultivo es empleada en un porcentaje superior al 70 % (Antúnez *et al.* 2010)

Teniendo en cuenta la anterior definición, el manejo eficiente de riego implica entonces un uso adecuado del recurso hídrico en los predios (FAO, n.d). Por lo tanto, se deben conocer cuáles son las pérdidas que existen no solo en la aplicación del agua al suelo, sino también durante su conducción desde el punto de captación.

La eficiencia de riego se determina por la eficiencia de conducción en el canal principal, la de distribución en los canales laterales y la eficiencia de aplicación a nivel de lote, así:

$$ESR = EC * ED * EA \quad (\text{Ec. 19})$$

Donde:

ESR = eficiencia del sistema de riego (%)

EC = eficiencia de conducción (%)

ED = eficiencia de distribución (%)

EA = eficiencia de aplicación (%)

Para evaluar la eficiencia de conducción, distribución y aplicación en los métodos de riego superficiales (surcos), es necesario conocer diferentes metodologías de aforo que ayudan a determinar el caudal. En esta unidad de aprendizaje, se partirá con la descripción de algunas de estas.

3.2 Medición del caudal (aforos)

La **medición del caudal** en el riego se realiza para controlar la cantidad de agua a cada usuario, detectar problemas en la operación del sistema, **determinar las**

pérdidas de agua en redes de distribución, calibrar estructuras de aforo, establecer la capacidad de sistemas de drenaje, etc.

Existen varios métodos de aforo como:

- Volumétrico
- Gravimétrico
- Método de área velocidad:
 - » Flotador
 - » Molinete
- Estructuras de aforo en canales abiertos:

Vertederos:

- » Aforador RBC
- » Vertedero rectangular de cresta afilada
- » Vertedero triangular de cresta afilada
- » Vertedero Cipotelli

Canaletas:

- » Sin cuello
- » Tipo Parshall

Orificios sumergidos

Para la evaluación de eficiencia de conducción y distribución, los métodos más usados son los aforos de velocidad y algunas estructuras para canales abiertos.

3.2.1 Aforo de velocidad y sección

Consiste en medir el área de la sección transversal (A) del flujo del agua y la velocidad media (V) del área donde se afora. Este método es utilizado principalmente para aforar canales, ríos, arroyos, etc. El caudal (Q) se expresa como:

$$Q = V * A \quad (\text{Ec. 20})$$

Donde:

$$Q = \text{caudal (m}^3\text{/s)}$$

$$V = \text{velocidad media (m/s)}$$

$$A = \text{área transversal (m}^2\text{)}$$

La exactitud de las mediciones del caudal depende gran parte del número de verticales en que se hagan observaciones de profundidad y velocidad (CVC, 2005). Las verticales de observación deben localizarse de modo que puedan definir adecuadamente la sección transversal del lecho y la variación horizontal de la velocidad.

Para establecer el número de verticales que pueden ser definidas para propósitos de medición del flujo en una sección, se aplica el siguiente criterio (Tabla 13):

Tabla 13. Número de verticales en función del ancho del canal Fuente: CVC (2005)

Ancho del canal (m)	No. de verticales
0 – 0,5	3 a 4
0,5 - 1	4 a 5
1 - 3	5 a 8
3 - 5	8 a 10
5 - 10	10 a 20
Más de 10	20 o más

Para determinar el área transversal en cada una de las verticales previamente definidas, se registra la profundidad formando a su vez subsecciones en las que será establecida la superficie independientemente. Al final se hace la sumatoria de todas y se halla el área total (Figura 27). En caso de tomar varias secciones transversales para un mismo aforo, estas se promedian.

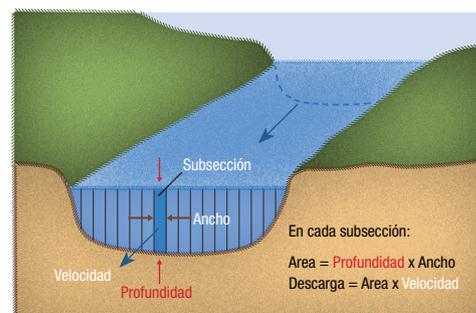


Figura 27. Representación gráfica del fundamento teórico para la determinación de caudal por el método de velocidad y sección. Fuente: USGS, <https://www.usgs.gov/media/images/a-century-usgs-measured-steam-discharge-using-current-meters>

El problema principal de este método es medir la velocidad media ya que varía en los distintos puntos de la sección hidráulica. Para los comúnmente utilizados, flotadores y molinetes, el cálculo de la velocidad requiere de un nivel de rigurosidad diferente. A continuación, se presenta su descripción y el procedimiento que debe realizarse en campo para efectuar el aforo.

3.2.1.1 Molinete y correntómetro digital

Estos instrumentos se utilizan para la medición de todo tipo de caudales, y pueden ser usados en corrientes naturales y canales de riego o drenaje. Permiten establecer la velocidad de flujo a diferentes profundidades y sobre diversas verticales en la misma sección (Figura 28), y determinar los perfiles de velocidad necesarios para hallar la velocidad promedio y el caudal que resulta del producto de esta velocidad con el área. El caudal total se calcula como la suma de los caudales en cada sección.

En los canales de riego o drenaje que tienen poca profundidad (menores a 60 cm), se realizan observaciones en cada vertical, colocando el molinete o correntómetro a 0,6 de la profundidad total por debajo de la superficie libre (0,6 d). Cuando las honduras de los canales son superiores a 60 cm, se recomienda medir la velocidad a 0,2 y luego a 0,8 de la profundidad de la superficie libre, usando el promedio de las dos

medidas como la velocidad media en la vertical. En la Tabla 14 se indican los puntos de medición de acuerdo con la profundidad del cauce.



Figura 28. Aforo de canales abiertos con correntómetro (a) Molinete (b). Fuente: <https://cedsa-panama.com/equipos-de-cedsa/>

Tabla 14. Profundidades sugeridas para la determinación de la velocidad de acuerdo con el tipo de cauce y su profundidad, basado en el método de puntos reducidos

Lechos	Profundidad	No. de puntos	Localización del punto	Fórmula
Poco profundos	< 60 cm	1	0,6 d	$V_m = V_{0.6}$
Poco profundos	> 60 cm	2	0,2 d 0,8 d	$V_m = (V_{0.2} + V_{0.8}) / 2$
Grandes con vegetación acuática		3	0,2 d 0,6 d 0,8 d	$V_m = (V_{0.2} + V_{0.6} + V_{0.8}) / 3$
Grandes sin vegetación acuática		5	Superficial 0,2 d 0,6 d 0,8 d Fondo	$V_m = 0,1 * (Vs + 3V_{0.2} + 3V_{0.6} + 2V_{0.8} + Vf)$

Fuente: ISO (2007)

Es importante tener en cuenta que cada tipo de molinete tiene ecuaciones específicas para establecer la velocidad del flujo. En la Figura 29 se indica cómo determinar el caudal por el método de la sección media.

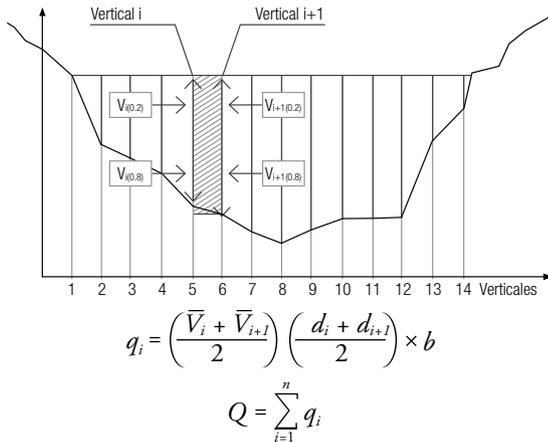


Figura 29. Cálculo del caudal por el método de la sección media, a partir de mediciones efectuadas con molinete. Fuente: ISO (2007)

3.2.1.2 Flotador

Consiste en determinar la velocidad superficial del agua a partir del concepto de espacio recorrido (X) por unidad de tiempo (t), donde un flotador, corcho o trozo de madera, será arrastrado por la corriente en una distancia conocida para la cual se registra el tiempo (Figura 30). Debido a la sencillez y practicidad de este método, es muy utilizado cuando no se dispone de un instrumento o equipo más confiable. Se recomienda para caudales menores de 200 litros por segundo.

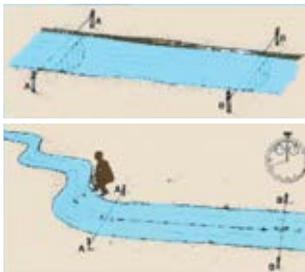


Figura 30. Representación gráfica del procedimiento efectuado en campo para la determinación de caudal por el método de flotador. Fuente: FAO (1998)

Es preciso tener claro que se realizan aforos con flotador en aquellos casos en que, por circunstancias imprevistas, sea imposible hacerlo por métodos más confiables. También, cuando se pueden utilizar los datos en forma aproximada o cuando la premura impide determinarlo por otro método (Nickisch, 2008).

El área seleccionada para llevar a cabo la prueba de aforo debe ser lo más recta posible y de sección transversal uniforme. No obstante, debido a que la velocidad superficial en el centro del canal es mucho mayor que la que se encuentra cerca al piso o a las paredes de este, es necesario afectar la velocidad por un factor de corrección (Tabla 15).

Tabla 15. Valores de factor de corrección que pueden ser utilizados de acuerdo con el tipo de cauce evaluado

Tipo de cauce	Factor de corrección	Precisión velocidad
Canal rectangular con lados y lechos lisos	0,85	Buena
Río profundo y lento	0,75	Razonable
Arroyo parejo de lecho liso	0,65	Mala
Arroyo rápido y turbulento	0,45	Muy mala
Arroyo muy poco profundo de lecho rocoso	0,25	Muy mala

Fuente: Ministerio de Agricultura y Riego (2015)

Finalmente, la velocidad media será:

$$v = X/t * FC \quad (\text{Ec. 21})$$

Donde:

X = espacio recorrido o tramo de aforo (m)

t = tiempo recorrido en el tramo evaluado (s)

FC = factor de corrección

3.2.2 Aforo mediante estructuras

Otro de los métodos utilizados para realizar aforos más eficientes y precisos, consiste en la utilización de estructuras especiales. Estas son comúnmente usadas en canales de riego y surcos.

Existe, sin embargo, gran cantidad de sistemas y dispositivos empleados en la medición de agua, cuyos diseños se basan en los fundamentos hidráulicos de orificios, vertederos y sección crítica. En esta unidad se describe el aforador RBC, utilizado en la evaluación de eficiencia de aplicación en sistemas de riego por surcos.

3.2.2.1 Aforador RBC

El aforador o canaleta RBC es una estructura portátil para la medición de caudales, que funciona bajo el principio de flujo de régimen crítico.

En la Figura 31 se muestra en detalle el esquema de esta estructura, que corresponde a un aforador de cresta ancha, al que se le pone una rampa con una pendiente 3:1 en la entrada para reducir el área de flujo (levanta-

miento gradual), y así provocar flujo crítico en la sección de control. El aforador se coloca en el fondo del canal en tramos rectos y donde el flujo sea uniforme, es decir no se deben presentar remolinos ni ondas en la superficie del agua. La distancia desde la regla de aforo hasta la rampa (L_a), debe equivaler como mínimo a tres veces el tirante máximo medido sobre la cresta de la estructura. Se tiene que proporcionar un borde libre equivalente a 0,2 veces el tirante máximo.

Torres *et al.*, 2004 muestran las secciones trapecoidales de este aforador, usadas en el cultivo de caña de azúcar para diferentes canales de riego, y que se pueden tener como referencia para su construcción, dependiendo el caudal (L/s) que pasa por el canal de riego (Tabla 16).

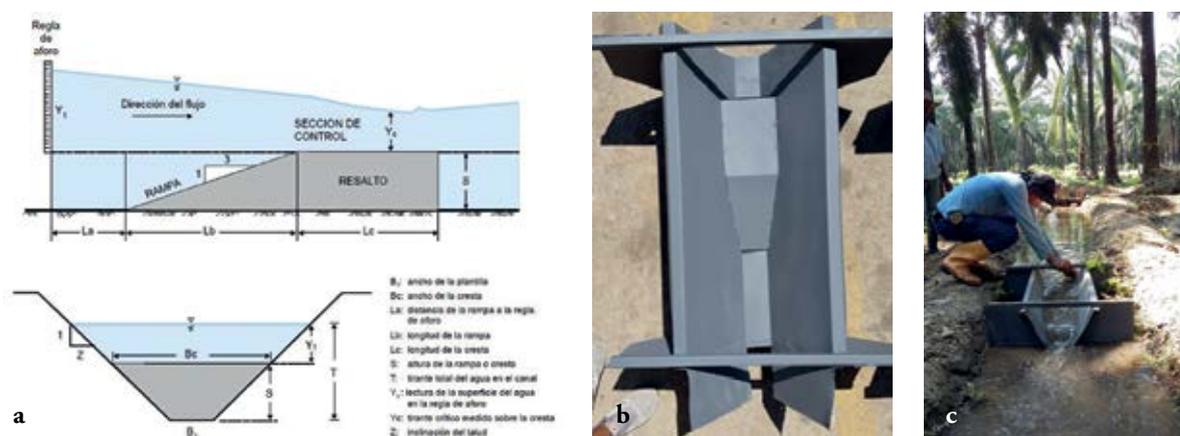


Figura 31. (a) Descripción gráfica del aforador RBC (b) Vista frontal. Fuente: Torres *et al.* (2004) (c) funcionamiento en campo

Tabla 16. Secciones de canales trapecoidales comúnmente utilizados en el cultivo de la caña para el transporte de agua

Canal	Talud Z:1	Altura de rampa (S) (m)	Plantilla (B_1) (m)	Tirante (T) (m)	Caudal (l/s)
Surco	2:1	0.05	0.05 - 0.10	0.15	Menos de 10
Terciario	1:1	0.20 - 0.25	0.40 - 0.80	0.40 - 1.00	100 - 300
Secundario	1.5:1	0.25 - 0.35	0.60 - 0.80	0.50 - 1.00	300 - 600
Primario	2:1	0.35 - 0.50	1.00 - 3.00	1.00 - 3.00	Más de 600

Fuente: Torres *et al.* (2004)

Es preciso tener en cuenta que posterior a la calibración de la regla limnimétrica de la estructura, solo es necesario leer directamente el valor del caudal en esta.

Consideraciones para la instalación de la canaleta RBC

- Limpiar el lugar en el que va a ser instalada la canaleta.
- Realizar un corte en el suelo para que las aletas delanteras y traseras de la canaleta entren, garantizando que el fondo de esta quede al mismo nivel que la superficie del suelo en el surco.
- Después de ubicarlo, se nivela en sentido longitudinal y transversal utilizando un nivel de albañil.
- Se terminan de llenar los laterales y principalmente la parte delantera con suelo, para impermeabilizar todas las posibles filtraciones y garantizar que el agua ingrese por la canaleta. Tenga presente que debe proyectar con suelo los deflectores de la canaleta para evitar un choque brusco del agua en la misma; de ser necesario, utilice plástico para impermeabilizar.

3.2.3 Aforo volumétrico

Este método consiste en medir el tiempo (t) que tarda una corriente de agua en llenar un recipiente de volumen conocido (V). Es necesario repetir el procedimiento mínimo tres veces y promediar la información obtenida (Figura 32). Finalmente, el caudal (Q) es:

$$Q = V/t \quad (\text{Ec. 22})$$

Donde:

Q = caudal (L/s)

V = volumen conocido (L)

t = tiempo (s)

Los aforos volumétricos permiten medir pequeños caudales de agua como sucede en surcos de riego y acequias, o para aforar aspersores y emisores de riego.

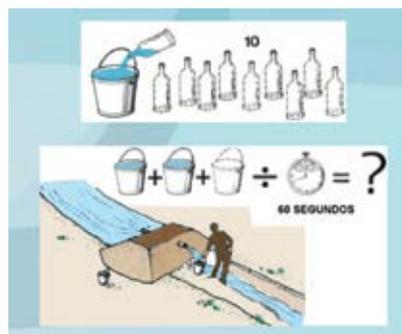


Figura 32. Representación gráfica del procedimiento efectuado en campo para la determinación de caudal por método volumétrico. Fuente: FAO (1998)

3.3 Eficiencia de conducción

La eficiencia de conducción permite evaluar la pérdida de agua en el canal principal, desde la bocatoma hasta donde termina. En caso de tener abiertos los canales de distribución durante la evaluación del canal principal, estos deben ser aforados y calcular la eficiencia así:

$$EC (\%) = \frac{Q_f + \sum Q_i}{Q_e} * 100 \quad (\text{Ec. 23})$$

Donde:

Q_f = caudal que llega al final del canal principal (L/s)

Q_i = caudal que ingresa a los canales de distribución (L/s)

Q_e = caudal que entra al inicio del canal principal (L/s)

Para su determinación se pueden usar los métodos de aforo descritos anteriormente (correntómetros, flotador, etc.). Estos se realizan generalmente cada 100 metros de longitud desde el punto de bombeo hasta el lote, utilizando el procedimiento de puntos reducidos (Tabla 14).

3.4 Eficiencia de distribución

Se obtiene de todos los canales de distribución de 1^{er}, 2^o, 3^{er}... orden, que sirven para repartir el agua hacia los demás lotes. Esta eficiencia mide la pérdida entre la toma lateral del canal principal, hasta la entrega a los usuarios de una zona de riego.

$$EDi = \frac{Qfd + \sum Qi}{Qed} * 100 \quad (\text{Ec. 24})$$

Donde:

Qfd = caudal que llega al final del canal de distribución (L/s)

Qi = caudal que ingresa a los canales laterales de riego (L/s)

Qed = caudal que entra al inicio del canal de distribución (L/s)

Finalmente, al existir un sistema de riego que contiene varios canales de distribución, la eficiencia se determina mediante la siguiente ecuación:

$$ED = \frac{\sum EDi}{n} \quad (\text{Ec. 25})$$

Donde:

EDi = eficiencia de distribución en canales de 1°, 2°, 3°... orden (%)

n = número total de canales de distribución

Para su medición en campo se utiliza la misma metodología descrita para establecer la eficiencia de conducción.

Práctica 2. Determinemos la eficiencia de conducción en un canal de riego

Objetivos

Al finalizar la práctica los participantes estarán en capacidad de:

- Identificar los criterios necesarios para seleccionar los puntos o zonas propicias para la medición de caudal o aforo.
- Medir el caudal en canales de riego o drenaje, mediante el método de aforo del flotador.
- Comprender la importancia de realizar aforos en campo, a partir de una metodología sencilla y de fácil alcance.
- Determinar las pérdidas por conducción de un canal y su eficiencia de conducción.

Orientaciones para el facilitador

- El facilitador deberá realizar un recorrido previo en la plantación donde se llevará a cabo el ejercicio, con el fin de seleccionar el canal y los diferentes tramos para las pruebas de aforo.
- El día de la práctica comparta con los participantes el objetivo e importancia de la misma.
- Explique a los participantes que este ejercicio contempla una actividad de campo para la toma de datos, y de salón para realizar el análisis de la información colectada.
- Conforme grupos de trabajo de tres personas. Cada uno estará encargado de realizar una prueba de aforo por flotador, por lo tanto, se debe indicar y guiar al punto o tramo asignado a lo largo del canal.
- Procure que el grupo sea liderado por una persona que tenga mayor conocimiento del tema. Para ello podrá identificarla en la presentación inicial.
- Entregue a los participantes el formato para registrar los datos a tomar en campo, y el procedimiento para adelantar esta actividad.
- Facilite a cada grupo los recursos necesarios para realizar los respectivos aforos.
- Acompañe periódicamente a los grupos de trabajo para resolver dudas y tomar nota de aspectos claves para la retroalimentación al final de la práctica.
- Coordine la exposición de los resultados finales de la actividad con los líderes de grupo.

Recursos necesarios

Tiempo total para la práctica: dos horas

Los siguientes recursos se requieren para cada grupo de trabajo:

- Cintas métricas de 5 m y 30 m
- Flotadores: 10 bolas de ping pong
- Regla o varilla delgada milimetrada de 1m de longitud
- Cronómetro

- Machete
- Rollo de cuerda o cabuya
- Cuatro estacas pequeñas (15 cm de alto x 3 cm de ancho)
- Hoja de trabajo

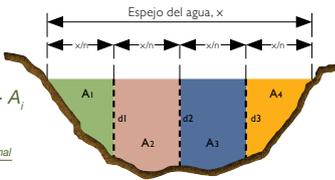
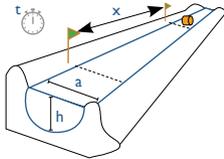
método del flotador y el cálculo de pérdidas por conducción (Anexo 1).

- En el transcurso de la actividad deberán consignar los resultados en los formatos 3 y 4 entregados por el facilitador.
- Dispondrán de 60 minutos para el desarrollo de la práctica, 40 minutos para realizar los cálculos respectivos y 20 minutos para la discusión de los hallazgos.
- Al finalizar, el líder de cada grupo expondrá los resultados.

Instrucciones para el participante

- Deben seguir las indicaciones planteadas en el material de apoyo, donde se describen detalladamente los pasos para la medición de caudales por el

Formato 3. Registro de aforo de caudal en campo, método del flotador

 Formato de trabajo: aforo de caudal												
A. INFORMACIÓN GENERAL												
Responsables:						Grupo:						
Fecha:						Plantación:						Evaluador:
Ubicación:						Latitud:						
						Longitud:						
B. FUNDAMENTO TEÓRICO												
A continuación encontrará las fórmulas requeridas para efectuar la determinación de caudal												
<p>Área</p> $A_i(m^2) = \frac{d_1 + d_2}{2} * x$ $A(m^2) = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n$ $A(m^2) = \frac{A_{inicial} + A_{medio} + A_{final}}{3}$ 						<p>Velocidad</p> 						
Caudal						$Q = V * A$						
C. PRÁCTICA												
Teniendo en cuenta las instrucciones brindadas por el facilitador, diligencie la siguiente información:												
Sección transversal (inicio)	Medición											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Profundidad (m)												
Ancho (m)												
Área (m²)												
Área total (m²)												
Sección transversal (medio)	Medición											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Profundidad (m)												
Ancho (m)												
Área (m²)												
Área total (m²)												

Continúa

Descripción de los métodos de evaluación de la eficiencia de los sistemas de riego por superficie y presurizados

Sección transversal (final)	Medición											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Profundidad (m)												
Ancho (m)												
Área (m ²)												
Área total (m ²)												
Velocidad (m/s)	Medición											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Longitud tramo evaluado (m)												
Tiempo (s)												
Velocidad (m/s)												
3. CÁLCULOS												
Área total promedio (m ²)												
Velocidad promedio(m/s)												
Caudal promedio (m ³ /s)												
Observaciones:												

Formato 4. Cálculo de pérdidas por conducción

Grupo:	Participantes:					
Detalles	Aforo	Distancia (m)	Velocidad(m/s)	Área (m ²)	Q (L/s)	EC(%) $EC = \frac{Q_f}{Q_e} \times 100$
Entrada o inicio canal	1					
Tramos	2					
Tramos	3					
Tramos	4					
Salida del canal	5					
$EC (\%) = \frac{Q_f + \sum Q_i}{Q_e} * 100$ <p> <i>Q_f</i> = caudal que llega al final del canal principal (L/s) <i>Q_i</i> = caudal que ingresa a los canales de distribución (L/s). Si los canales están cerrados este valor es cero <i>Q_e</i> = caudal que llega al inicio del canal principal (L/s) </p>						

Información de retorno

Una vez terminada la práctica y el desarrollo de los ejercicios en el salón, el facilitador invitará a los líderes de cada grupo a contar a los demás las observaciones presentadas durante la práctica, los inconvenientes encontrados, las apreciaciones acerca del método y, finalmente, el impacto de este aprendizaje en sus labores.

3.5 Eficiencia de aplicación

La eficiencia de aplicación se define como la relación entre el volumen de agua almacenado en la zona de raíces (VZR) para uso consuntivo, y el volumen total aplicado (VTA) (FAO, n.d). Esta depende en gran medida del método de riego utilizado, por lo tanto, su determinación está sujeta a la cuantificación de las pérdidas ocasionadas en cada uno de ellos.

$$E_a = \frac{VZR}{VTA} * 100 \quad \text{O} \quad E_a = \frac{LZR}{LTA} * 100 \quad (\text{Ec. 26})$$

Donde:

E_a = eficiencia de aplicación (%)

VZR o LZR = volumen (m^3) o lámina (mm) en la zona de raíces

VTA o LTA = volumen (m^3) o lámina (mm) total aplicada

3.5.1 Eficiencia de aplicación de un sistema de riego por surcos anchos

Para establecer la eficiencia de aplicación de este sistema, es necesario evaluar la lámina almacenada en el suelo, su uniformidad de distribución, la porción del campo que recibió una lámina inferior a la requerida, la lámina de agua perdida como percolación profunda, y la cantidad de agua malgastada por escorrentía (los dos últimos parámetros inevitablemente se producen en este tipo de sistemas) (Figura 33).

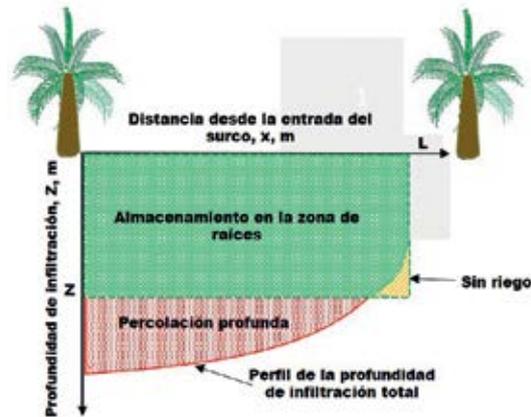


Figura 33. Patrón de infiltración característico de un sistema de riego por surcos. Adaptado de Walker y Skokerboe (1987).

3.5.1.1 Fases del riego por surcos

Primero ocurre la entrega del agua a los surcos que puede hacerse por medio de boquetes abiertos en el talud de la acequia de riego. En reemplazo de los boquetes se utilizan sifones de PVC, y es necesario mantener un caudal constante para evitar cambios en el caudal entregado a los surcos (q). También se puede optar por la instalación de tubos cortos de PVC, empotrados en el talud de la acequia de riego.

- **Fase de avance:** una vez el agua se vierte en la cabecera, el surco se llena gradualmente y luego fluye por gravedad bajo los principios hidráulicos que gobiernan el flujo del agua en un canal.

Para la evaluación en campo, se registra el tiempo cuando el frente de avance del agua llega a cada una de las estacas colocadas previamente a lo largo del surco. Se recomienda un mínimo de seis estacas espaciadas cada 30 m o colocadas proporcionalmente a lo largo del surco. La curva de avance se obtiene al graficar el tiempo de avance vs. la distancia ($0L, \frac{1}{4}L, \frac{1}{2}L, \frac{3}{4}L, L$).

- **Fase de humedecimiento:** inicia cuando el frente de avance del agua llega al final del surco, y termina en el momento en que se corta el suministro de agua en la cabecera del surco.

- **Fase de agotamiento:** empieza en el momento en que se interrumpe el suministro de agua al surco y termina cuando el agua desaparece de la superficie del suelo en cada estación de medición.
- **Fase de recesión:** en los campos regados por gravedad, esta fase termina cuando el agua desaparece de la superficie del suelo en cada una de las estaciones de medición.

Tiempo de oportunidad de contacto: hace referencia al tiempo acumulado entre el momento en que el agua llega a un punto a lo largo del surco (inicia el proceso de infiltración), y cuando desaparece de la superficie en el punto de observación (cesa la infiltración).

3.5.1.2 Ecuación de infiltración a partir del balance de volúmenes

El método de Elliot y Walker (1982) sugiere calcular la infiltración en el surco a partir del balance de volúmenes en dos puntos, durante la fase de avance.

La ecuación de balance de volúmenes a cualquier momento (t_x) se puede expresar así:

Volumen de agua entregada al surco = vol. agua almacenada en el surco + vol. de agua infiltrada

$$Q_0 t = \rho_y A_0 x + \rho_z K t^a x + \frac{f_0 t x}{1+x} \quad (\text{Ec. 27})$$

Donde:

Q_0 = caudal por surco, m^3/min

A_0 = área de flujo a la entrada del surco, m^2

t = tiempo transcurrido desde el inicio del riego, min

P_y = factor de forma del agua almacenada sobre la superficie (valor más usado =0,77)

P_z = factor de forma del perfil del agua infiltrada

K y a = parámetros de la ecuación de Kostiakov y Lewis

x = distancia recorrida por el agua en el surco

a = exponente de la ecuación de Kostiakov y Lewis

r = exponente de la ecuación de avance

f_0 = infiltración básica, m^3/min

3.5.1.3 Evaluación de desempeño del sistema de riego

El propósito central de la evaluación es obtener parámetros suficientes que califiquen el desempeño del riego, en este caso para el método de surcos anchos. A continuación, se presenta la definición de dichos parámetros:

Eficiencia de aplicación: es la relación entre el agua neta almacenada en la zona de raíces como consecuencia del riego, y el agua total aplicada en el proceso. Se puede hacer en lámina o volumen.

$$E_a (\%) = \frac{\text{volumen neto almacenado z. raíces}}{\text{volumen total aplicado}} * 100 \quad (\text{Ec. 28})$$

Eficiencia de almacenamiento: es la relación entre el agua neta almacenada en la zona de raíces como consecuencia del riego, y el agua rápidamente aprovechable (ARA). Se expresa en términos de volumen.

$$E_{al} (\%) = \frac{\text{volumen neto almacenado z. raíces}}{\text{volumen de agua correspondiente a la LARA}} * 100 \quad (\text{Ec. 29})$$

Pérdidas por percolación: se define como la relación entre el agua percolada por debajo de la zona de raíces, y el agua total aplicada. Se expresa en volumen

$$P_p (\%) = \frac{\text{volumen percolado}}{\text{volumen total aplicado}} * 100 \quad (\text{Ec. 30})$$

Pérdidas por escorrentía: es la relación entre el agua que se pierde al final del surco y el agua total aplicada. Se expresa en volumen

$$P_E (\%) = \frac{\text{volumen perdido por escorrentía}}{\text{volumen total aplicado}} * 100 \quad (\text{Ec. 31})$$

Si se conoce la eficiencia de aplicación y las pérdidas por percolación, las pérdidas por escorrentía se pueden determinar como:

$$P_E (\%) = 100 \% - E_a (\%) - P_p (\%) \quad (\text{Ec. 32})$$

Ahora bien, si se conoce la eficiencia de aplicación y las pérdidas por escorrentía, las pérdidas por percolación profunda serían:

$$P_p (\%) = 100 \% - E_a (\%) - P_E (\%) \quad (\text{Ec. 33})$$

Actividades en campo para la evaluación del desempeño del riego por surcos

La evaluación del riego por surcos consiste en actividades prácticas que deben realizarse antes, durante y después del riego.

Antes del riego

- Se requiere contar con la caracterización de las propiedades físicas descritas en la Unidad 1.
- Respecto a la infiltración, se recomienda tomarla en la parte de la cabecera, centro y final del surco a evaluar (Figura 34).



Figura 34. Puntos sugeridos para la determinación de la infiltración en el surco a evaluar. Fuente: Jurado, J.

- Medir la pendiente longitudinal del suelo (Figura 35).

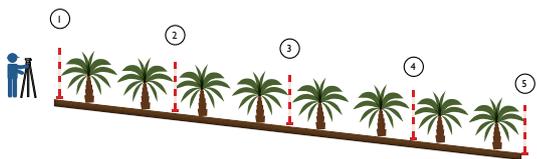


Figura 35. Esquema de la determinación de la pendiente en el surco a evaluar. Fuente: Jurado, J.

- Instalar un equipo de medición de caudales: aforador RBC (Figura 36).



Figura 36. Instalación de instrumentos de aforo (RBC) en los puntos evaluados

- Determinar la humedad del suelo.

Durante el riego

Realizar las mediciones de caudales de entrada, velocidad de avance del agua a lo largo del surco, la escorrentía o apozamiento y la velocidad de recesión (Figura 37).



Figura 37. Evaluación de sistema de riego por surcos en palma de aceite, avance del agua. Fuente: Jurado, J.

Después del riego

- Medir la humedad del suelo.

Práctica 3. Determinemos el desempeño de un sistema de riego por surcos

Objetivos

Al finalizar la práctica los participantes estarán en capacidad de:

- Identificar y comprender los diferentes componentes requeridos para la evaluación de la eficiencia de un sistema de riego por surcos, en el cultivo de palma de aceite.
- Calcular los diferentes parámetros que califiquen el desempeño del sistema de riego.
- Realizar la evaluación del sistema de riego por surcos en sus plantaciones.
- Analizar críticamente los resultados obtenidos de la evaluación, identificando las principales causas de las pérdidas.

Orientaciones para el facilitador

- Para desarrollar en forma adecuada esta práctica, el facilitador deberá coordinar con la plantación, con una semana de anticipación, la asignación del riego para el lote en el que se realizará la prueba y garantizar el acompañamiento del personal encargado de la supervisión y ejecución de la labor.
- Recorra el lote con el fin de establecer los posibles surcos en los que se puede llevar a cabo dicha labor, puesto que la duración depende significativamente de la sección hidráulica de los surcos y de su longitud. Esta última no deberá exceder los 50 m para no alargar la prueba y poder completar toda la información necesaria.
- Informe a los participantes que esta práctica se llevará a cabo en un lote donde se está realizando el riego, para que utilicen la ropa adecuada.
- Explique los objetivos de la práctica. Anuncie que tendrá una etapa de campo para la toma de datos, y otra de salón para realizar el análisis de los resultados.

- Conforme grupos de cuatro o cinco personas y solicite que seleccionen un líder por equipo para la exposición de los resultados.
- Aclare que la etapa de campo de la práctica se hará en tres etapas: (1) instalación de los instrumentos de aforo a la entrada y salida del surco, (2) establecimiento de estaciones de observación de avance del agua (estacas cada 10 m), y (3) medición de los caudales de entrada, velocidad de avance y caudal de salida.
- Informe que en la etapa de aula se realizarán todos los cálculos requeridos con los datos recolectados, para determinar la eficiencia de aplicación del sistema y las pérdidas.
- Dado que se requiere de información sobre la caracterización de suelos, que no se medirán en la práctica, el facilitador les brindará datos de:
 - » Textura
 - » Lámina a capacidad de campo (Lam_{CC}), lámina a punto de marchitez permanente (Lam_{PMP}) y lámina de agua aprovechable (LAA)
 - » Ecuación de infiltración
 - » Pendiente del terreno

Para el cumplimiento de esta práctica el orientador deberá asegurar:

- » Que a cada equipo lo acompañe al menos un trabajador (palero) para ayudar con la instalación de los instrumentos de aforo y demás imprevistos que puedan presentarse.
- » Que cada grupo tenga las herramientas e insumos requeridos para la práctica, así como los elementos de seguridad.
- » Que cada equipo cuente con el formato para la recolección de datos.
- Ante cualquier inconveniente que impida la determinación de los parámetros requeridos para la estimación de la eficiencia del sistema, se debe

brindar a los participantes el anexo técnico (Ejercicio 4) de la FAO para solucionarlo en campo.

- Al finalizar esta actividad, solicite a cada uno de los coordinadores de los grupos que expongan los resultados y conclusiones del ejercicio.

Recursos necesarios

A continuación, se presentan los recursos necesarios por grupo.

En campo

Tiempo requerido: seis horas

- Dos canaletas RBC de 25 L/s
- Una cinta métrica de 5 m y otra de 30 m o más
- Un nivel de albañil
- 15 banderillas de papel, estacas o jalones
- Una pala, palín y machete
- Un cronometro
- Una calculadora
- Formato 5
- Un marcador permanente
- Un lapicero

En el salón

- Calculadora
- Ejercicio impreso acompañado de hoja de fórmulas
- Papel en blanco
- Lapiceros
- Marcadores de punta delgada

Instrucciones para el participante

- Los participantes deberán estar atentos a las indicaciones del facilitador, y seguir adecuadamente el procedimiento planteado en el material de apoyo.
- En el transcurso de la práctica tendrán que consignar los resultados en el Formato 5 entregado por el facilitador.
- Dispondrán de cuatro horas para el desarrollo de la práctica, y dos horas para determinar las pérdidas y eficiencia de aplicación del sistema de riego por surcos evaluado,
- Al finalizar, el líder de cada grupo presentará los resultados.

Ejercicio 4. Problema tomado de la FAO (Walker, 1989)

EJERCICIO PROBLEMA

Se realizó una evaluación de un sistema de surcos existente durante un evento de riego. Las características del lote son las siguientes:

Suelo: franco arenoso

Lámina de agua aprovechable: 9,5 cm

Pendiente: 0,0075

Longitud del surco: 200 m

Espaciamiento entre surcos: 0,75 m

La función de infiltración del suelo es:

$$Z = 0.00213t^{0.532} + 0.000315 t$$

Las mediciones de campo adicionales realizadas durante cada evaluación fueron: el registro de caudales en la entrada y la salida del surco, y las trayectorias de avance y receso. El caudal de entrada fue constante = $0,12 \text{ m}^3 / \text{min}$ y fue suspendido a los 390 minutos.

Distancia de avance	Tiempo de avance	Tiempo de recesión
(metro)	(min)	(min)
0 0	0	390
47	6	396
112	18,0	402
151	30,0	405
200	54,8	408

Tiempo desde que comenzó el riego	Caudal de salida
(min)	(L/s)
54	0 0
57	0,079
63	0,264
72	0,39
84	0,494
102	0,593
132	0,694
192	0,804
252	0,867
312	0,909
372	0,939
390	0,949
399	0,777
402	0,538
408	0,0581
411	0

Preguntas:

¿Cuál es la eficiencia de aplicación del sistema de riego?

¿Se presentan pérdidas en el sistema de riego?

¿Fue un riego con una eficiencia de almacenamiento mayor al 50 %?

Información de retorno

- El facilitador puede conducir una discusión acerca de la práctica en campo, los cálculos realizados y los resultados obtenidos.
- Invitar a los participantes a evaluar dentro de sus plantaciones y compartir los resultados obtenidos.
- Para concluir, preguntar las posibles mejoras que pueden hacerse al sistema evaluado para contrarrestar las pérdidas.

3.5.2 Evaluación de la eficiencia de sistemas de riego presurizados

3.5.2.1 Sistema de riego por aspersión

Como todos los sistemas de riego, es indispensable evaluar su desempeño hidráulico no solo después de haber hecho la instalación para verificar su funcionamiento de acuerdo con lo diseñado, sino también antes de cada campaña de riego para detectar posibles daños en el sistema que afecten la eficiencia de aplicación.

La evaluación consiste en el análisis de información tomada en el campo bajo las condiciones y prácticas de riego seguidas comercialmente. También se incluyen estudios de caso donde se cambian las presiones de operación de los aspersores y los tiempos de aplicación. La

información requerida incluye: lámina de riego, caudal del aspersor, uniformidad de aplicación, tasa de infiltración, duración de la aplicación, condiciones del suelo y calidad del riego.

a. Evaluación de la uniformidad

Para examinar la uniformidad de un sistema de riego por aspersión se debe seleccionar la zona a evaluar, de tal manera que sea representativa del funcionamiento del sistema: características de los aspersores (presión vs. q , diámetro de humedecimiento), marco de riego, número de boquillas y diámetro.

Generalmente se recomienda elegir tres zonas: (1) la parte próxima al cabezal de campo, (2) la mitad del lote y (3) el área más alejada, ya que de esta manera se podrá hacer la evaluación en el sitio donde la presión sea cercana a la media y a la mínima.

Una vez seleccionadas las áreas de evaluación, se procede con la instalación de una red de recipientes sobre el suelo, formando una malla de 2x2 metros entre dos laterales que recojan el agua de mínimo seis aspersores (Figura 38). Sin embargo, esta cantidad se define teniendo en cuenta el diseño del sistema. Paralelo a esta actividad se recomienda instalar tres recipientes adicionales, en un área cercana, para medir las pérdidas por evaporación durante la prueba.

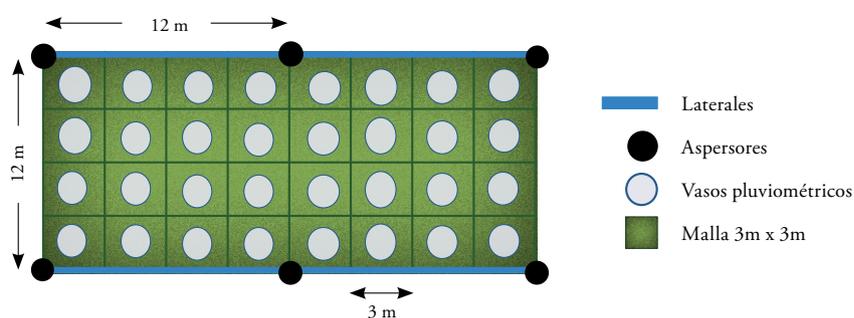


Figura 38. Esquematización de la distribución de los vasos pluviométricos instalados en campo para la evaluación del sistema de riego por aspersión

Una vez colocados los vasos o recipientes, se inicia con el riego por mínimo una hora para que los datos sean más confiables. Cuando finalice este tiempo,

se deja de regar y se realiza la medición del volumen recogido en cada vaso con ayuda de una probeta (Figura 39).

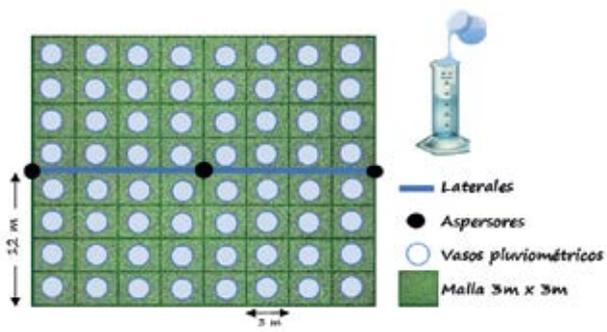


Figura 39. Procedimiento posterior a la prueba con los vasos pluviométricos instalados en campo

Con los volúmenes de agua recolectados se determinarán los siguientes parámetros:

- La media de todos los volúmenes medidos en cada uno de los vasos V_m .
- La media de los volúmenes medidos en la cuarta parte de los vasos que han recogido menos agua $V_{25\%}$.

b. Coeficiente de uniformidad del sistema de riego por aspersión

El coeficiente de uniformidad de Christiansen (CU) es ampliamente usado. Un CU igual o mayor que 0,7 es considerado aceptable a la práctica del diseño de sistemas de riego por aspersión. La ecuación de Christiansen (1942) es la siguiente:

$$Cu = 100 \left[1 - \frac{\sum_i^n (X_i - X)^2}{Xn} \right] \quad (\text{Ec. 34})$$

Donde:

X_i : media de cada recipiente

X : valor medio del agua recogida en todos los recipientes

n : número de recipientes

Otro de los parámetros que se determina es la uniformidad de distribución (UD) de las áreas evaluadas mediante la siguiente ecuación:

$$UD = \frac{V_{25\%}}{V_m} * 100 \quad (\text{Ec. 35})$$

La uniformidad de distribución es un indicador de la uniformidad de altura de agua infiltrada a lo largo y ancho de la parcela.

Como se mencionó anteriormente, dentro de la evaluación de este sistema de riego es importante contemplar también el **aforo** y **chequeo de las presiones** a los aspersores donde se realiza la prueba de campo (Figura 40). Con esta información se podrá determinar la diferencia de presión entre el primer y último aspersor del módulo, y se evaluará el funcionamiento del aspersor respecto a sus especificaciones técnicas.



Figura 40. (a) Medición de caudal (aforos) (b) Registro de presiones en los aspersores evaluados

c. Eficiencia actual de aplicación (E_a , %)

Permite determinar en campo qué tan bien está siendo utilizado un sistema de riego por aspersión. Así, bajos valores indicarán problemas en su manejo y uso. La E_a para este método de riego se define por la eficiencia del cuarto menor dada por la siguiente relación (Pereira *et al.*, 2010):

$$E_a = 100 * \left(\frac{Z_{r,lq}}{D} \right) \quad (\text{Ec. 36})$$

Donde:

$Z_{r,lq}$: cantidad media (altura media del agua) almacenada en la zona de raíces (mm)

D : dosis bruta (altura media aplicada) por los aspersores (mm)

d. Eficiencia potencial de aplicación (PELQ, %):

Indica una medida del posible desempeño del sistema bajo un buen manejo en el momento en que aplica el riego. Bajos valores están asociados con ineficientes diseños de sistemas de riego por aspersión. Se determina mediante la siguiente ecuación (Merriam & Keller, 1978):

$$PELQ = 100 * \left(\frac{Z_{r,lq,MAD}}{D_{MAD}} \right) \quad (\text{Ec. 37})$$

Donde:

$Z_{r,lq,MAD}$: cantidad media (altura media) de agua infiltrada en el cuarto menor de la parcela (mm) cuando es igual a MAD

D_{MAD} : dosis bruta aplicada (altura media aplicada) (mm) cuando el déficit de agua en el suelo es igual a MAD

MAD: déficit permisible de manejo de agua en el suelo (mm)

De acuerdo con Martin *et al.* (1990) citado por Peralta *et al.* (2010), MAD (*management allowed depletion*) puede ser superior o inferior al factor de agotamiento (fa) según los objetivos de la programación de riego. Se asume $MAD < fa$, para disminuir el riesgo de que los cultivos sufran estrés y cuando se tiene incertidumbre con el manejo del riego. Al contrario, se elige $MAD > fa$, cuando los recursos hídricos disponibles no son suficientes para cubrir los requerimientos de riego del cultivo.

3.5.2.2 Sistema de riego por goteo

Al igual que en otros sistemas de riego descritos en esta unidad, la evaluación para este contempla la determinación de la **eficiencia de aplicación** que establece la cantidad de agua que no es retenida en la zona radicular, en relación al total de agua aplicada al suelo; la **eficiencia de almacenamiento** que define la porción de agua aplicada que queda almacenada en el suelo, en relación a la necesaria para llevar el suelo a capacidad de campo; y la **eficiencia de uniformidad** que hace

referencia a la homogeneidad de entrega de agua por parte de los emisores (goteros) al suelo.

Según Antúnez *et al.* (2010), en los sistemas de riego por goteo se busca que cada una de las plantas reciba aproximadamente la misma cantidad de agua, reflejando una buena eficiencia de aplicación. Si, por el contrario, el riego no es uniforme, algunas áreas tendrán más agua que la necesaria y se presentarán pérdidas por percolación profunda debajo de la zona de raíces, y en otras, las plantas recibirán menos agua afectando su desarrollo (Figura 41).

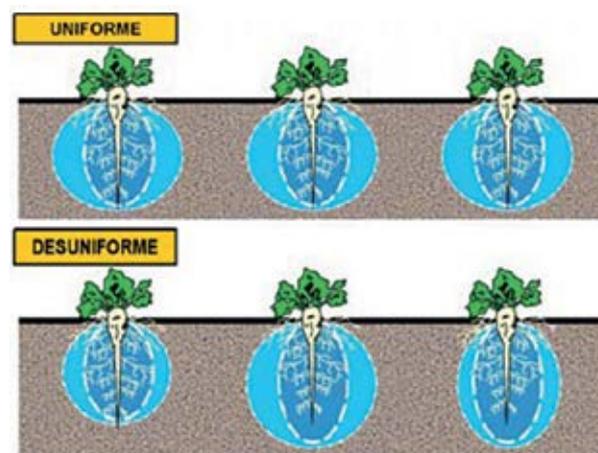


Figura 41. Representación gráfica de las situaciones que pueden presentarse en la humedad del suelo, producto de la eficiencia del sistema de riego por goteo. Fuente: Antúnez *et al.* (2010)

Medición de la eficiencia de uniformidad del sistema de riego por goteo

Para determinar la eficiencia de uniformidad, a continuación, se indica el procedimiento propuesto por Antúnez *et al.* (2010).

En campo

1. Seleccionar los laterales de los extremos y dos de la parte media del área regada por goteo.
2. Escoger los emisores a evaluar en cada lateral como se muestra en la Figura 42.

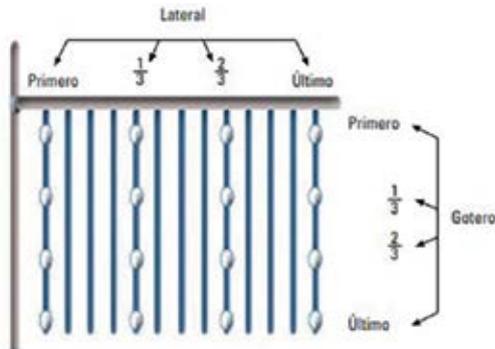


Figura 42. Puntos o laterales sugeridos para la evaluación del sistema de riego por goteo. Fuente: Antúñez *et al.* (2010)

3. Medir el volumen de agua que entregan los emisores en un tiempo entre uno y cinco minutos. Utilizar una probeta para esta actividad.

Análisis de datos

Con los datos colectados en campo se determina la eficiencia de uniformidad utilizando la siguiente ecuación:

$$Cu = 100 \left[1 - \frac{\sum_i^n 1(X_i - X)}{Xn} \right] \quad (\text{Ec. 38})$$

Donde:

X_i : caudal medio en un emisor dado

X : promedio del total de caudales registrados

n : número de emisores evaluados

En la Tabla 17 se presentan las categorías de eficiencia de uniformidad (Eu) para sistemas de riego presurizados, según Christiansen (1942):

Tabla 17. Categorías de eficiencia de uniformidad (Eu)

Categoría	Eu (%)
Excelente	90-100
Buena	80-90
Aceptable	70-80
Inaceptable	Menos de 70

Para utilizar la ecuación (Ec. 26), se recomienda tomar muestras de suelo para conocer la humedad antes y después del riego (24 y 48 horas), en los mismos puntos seleccionados para establecer la uniformidad del mismo. Con esta información, se obtiene la lámina o volumen de agua almacenada en la zona de raíces del cultivo, y se relaciona con la lámina o volumen de agua aplicada.

Práctica 4. Determinemos la eficiencia de uniformidad de un sistema de riego por aspersión

Objetivo

Brindar a los participantes una mejor comprensión de la metodología para evaluar el desempeño de un sistema de riego por aspersión.

Orientaciones para el facilitador

- Para desarrollar en forma adecuada esta práctica, el facilitador deberá coordinar con la plantación, con unos días de anticipación, la asignación del riego para el lote en el que se realizará la prueba, y garantizar el acompañamiento del personal encargado de la supervisión y ejecución de la labor.
- Revisar el lote un día antes de la práctica, con el fin de establecer los módulos de riego en donde se va a llevar a cabo la evaluación-
- Solicitar a la plantación que en lo posible se limpie el área seleccionada para la práctica, uno o días antes de su desarrollo.
- Explicar los objetivos de la actividad e informar que tendrá una etapa de campo para la toma de datos, y otra de salón para hacer el análisis de los resultados.
- Conformar dos grupos y explicarles que la fase de campo se hará así: (1) cada grupo deberá instalar los recipientes asignados, según las indicaciones dadas por el facilitador y el formato de apoyo (Anexo 3); (2) durante el riego, en laterales cercanos al de evaluación, determinar la presión de los aspersores de acuerdo con lo indicado en el formato de apoyo;

(3) después de la hora de riego, cuando este se apague, medir el volumen de agua de cada vaso y registrar los datos en el Formato 6.

- Garantizar que cada grupo tengan los recursos requeridos para la práctica, así como los elementos de seguridad.
- Entregar a cada grupo el formato con el procedimiento para realizar la práctica (Anexo 3) y el de recolección de datos.
- Informar que en la etapa de aula, se harán todos los cálculos requeridos con los datos recolectados para determinar la eficiencia de uniformidad y aplicación del sistema, utilizando las ecuaciones explicadas en clase (30, 31 y 32).
- Al finalizar esta actividad, solicite a los coordinadores de cada grupo que expongan los resultados y conclusiones del ejercicio.

Recursos necesarios

Tiempo requerido: cinco horas

- 300 recipientes (vasos)
- Cinco manómetros de presión
- Cinco probetas para cada grupo
- Cinco baldes de 5 litros
- Dos cronómetros
- Un flexómetro para cada grupo
- Un machete para cada grupo
- Formato 6 y procedimiento (Anexo 3)
- Lápiz, lapicero, tajalápiz y borrador

Instrucciones para el participante

- Los participantes tendrán que estar atentos a las indicaciones del facilitador y seguir adecuadamente el procedimiento planteado en el material de apoyo (Anexo 3).
- En el transcurso de la práctica en campo, deben registrar la información en el Formato 6 entregado por el facilitador.
- Dispondrán de tres horas para el desarrollo de la práctica y una hora para los cálculos de presiones, caudales, eficiencia de uniformidad y de aplicación del sistema de riego por aspersión.
- Al finalizar el ejercicio, tendrán 30 minutos para que el representante de cada grupo exponga los resultados obtenidos, indicando también los inconvenientes que tuvieron en el desarrollo de la actividad y cómo lograron superarlos.

Información de retorno

Para concluir la práctica, el facilitador realizará una plenaria en la que enfocará la discusión hacia los siguientes aspectos:

- Detallar las dificultades presentadas durante la etapa de campo y en los cálculos, e indicar las posibles soluciones que plantearon en ese momento.
- Describir las razones de por qué es importante realizar estas evaluaciones.
- Indagar ¿Consideran útil esta metodología para implementarla en su plantación?

Bibliografía

- Antúnez, B. A., Mora, L. D., & Felmer, E. S. (2010). Eficiencia en sistemas de riego por goteo en el secoano. *INIA Tierra adentro*, 1, 40–43. Recuperado de: <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/ta/NR36672.pdf>
- Christiansen, J. E. (1942). Irrigation by Sprinkling. *University of California Agricultural Experiment Station Bulletin*, 670, 124.
- CVC. (2005). *Manual de procedimientos hidrométricos*. Recuperado de: <https://docplayer.es/18491382-Manual-de-procedimientos-hidrometricos.html>
- Elliott RL, Walker WR (1982). Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Trans ASAE* 25(2):396–400
- FAO (n.d). Diseño métodos de riego. Capítulo 3. Eficiencia de riego. Recuperado de http://www.fao.org/tempref/GI/Reserved/FTP_FaoRlc/old/prior/reccat/pdf/MR_cap3.PDF
- FAO. (1998). Estimación de caudal. Recuperado de: http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6705s/x6705s03.htm
- Gurovich, L. (2003). Riego superficial tecnificado (Segunda ed.). Bogota: Alfaomega
- ISO. (2007). *ISO 748-Hydrometry - Measurement of liquid flow in opened chanelns using current-meters of floats*.
- Merriam, J., & Keller, J. (1978). *Farm irrigation system evaluation: a guide for management*. Utha, USA: Utha State University.
- Ministerio de Agricultura y Riego. (2015). *Manual del Cálculo de Eficiencia para Sistemas de Riego*. Lima, Perú.
- Nickisch, M. B. (2008). *Curso Aforadores de corrientes de agua*. Santiago del Estero, Argentina: INTA.
- Pereira, L., Valero, J. A., Picornell, R., & Tarjuelo, J. M. (2010). *El riego y sus tecnologías*. España: CREA, Universidad de Castilla -La Mancha,
- Torres, J., Cruz, R., & Villegas, F. (2004). Avances técnicos para la programación y el manejo del riego en caña de azúcar. Segunda edición. Cenicaña (p. 66).
- Walker, W. R. (1989). Guidelines for designing and evaluating surface irrigation systems. *FAO, Irrigation and Drainage Paper* 45.
- Walker, W. R., & Skogerboe, G. V. (1985). *The theory and practice of surface irrigation design. A guide for study in surface irrigation Engineering*. Utah, USA: Utah State University

Anexo 1. Material de apoyo. Aforo en canales abiertos por el método del flotador

Etapas de campo

Tiempo: una hora

1. Seleccione el tramo de aforo (AB)

- En el lugar asignado, elija un tramo de canal recto y con un ancho homogéneo. Si se presenta vegetación dentro del canal, se debe realizar la limpieza.
- Con la ayuda de una cinta métrica mida una longitud mínima de 10 m. En los dos extremos perpendiculares a la línea de flujo, coloque una cuerda amarrada a dos estacas previamente ancladas sobre la superficie del suelo. Estos serán los puntos de observación del aforo.

2. Mida la sección transversal de aforo

- El tramo (AB) se subdivide en tres secciones trasversales (inicio, medio y final).
- En cada una registre: ancho y profundidad hasta el nivel del agua. Tenga en cuenta el Formato 3 para establecer el número de verticales que deberá tomar en cada sección, de acuerdo con el ancho del canal, y que finalmente conformarán las subsecciones.

3. Mida la velocidad del agua

- Se ubican dos personas: una en el extremo aguas arriba y otro en el extremo aguas abajo en la línea visual donde se habían establecido previamente los puntos de observación del aforo (paso 1).
- La persona situada aguas arriba, lanza el flotador desde el primer punto (A). Se inicia el conteo con el cronómetro apenas el flotador atraviesa este punto, y se contabiliza el tiempo transcurrido hasta atravesar el punto B.

- Este procedimiento se realiza entre tres y cinco veces, registrando la información en el Formato 3.

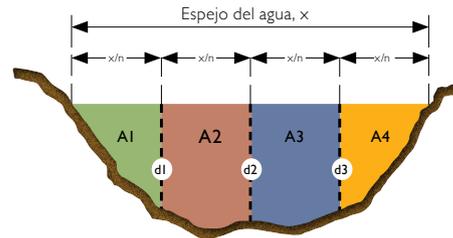
En el salón

Tiempo: 40 minutos

1. Calcule el área de la sección transversal de aforo (A)

- Determine el área de las tres secciones transversales (inicial, medio y final) utilizando la siguiente ecuación:

$$A_i (m^2) = \frac{d_1 + d_2}{2} * x$$



$$A (m^2) = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_i$$

- Promedie el valor del área de las tres secciones transversales.

$$A (m^2) = \frac{A_{inicio} + A_{medio} + A_{final}}{3}$$

2. Establezca la velocidad del agua (V):

- Promedie los tiempos registrados.
- Determine la velocidad utilizando la siguiente ecuación:

$$v (m/s) = \frac{distancia (m)}{tiempo (s)}$$

- Teniendo en cuenta que la medición se realiza en un canal de riego, utilice el valor 0,85 como factor de corrección.

$$v (m/s) = v * 0,85$$

3. Determine el caudal (Q)

$$EC_l = \frac{Q_i}{Q_e} * 100$$

- Calcúlelo utilizando la ecuación: $Q = v * A$

4. Tase las pérdidas de conducción

Unifique los caudales obtenidos por cada grupo en el Formato 4. Se requiere ingresar la información de velocidad, área y caudal.

Establezca las pérdidas de caudal en cada tramo utilizando la ecuación:

Finalmente determine la eficiencia de conducción en la longitud del canal evaluado en la práctica, mediante el uso de la siguiente ecuación:

$$EC(\%) = \frac{Q_f + \sum Q_i}{Q_e} * 100$$

Anexo 2. Material de apoyo para la evaluación de desempeño del sistema de riego por surcos

Procedimiento en campo

1. Instalación de instrumentos de aforo y diagnóstico del sistema

- En el inicio y final del surco a evaluar instale una canaleta RBC.
- Tome la siguiente información: ancho y largo del surco, altura y ancho de las bordas, y número de palmas regadas en la sección evaluada.

2. Registro del caudal de entrada y salida

- Posterior a la instalación de las canaletas, se inicia la prueba registrando la hora en la que empieza.
- Revise y anote a la par con el tiempo de avance en cada punto de observación, el caudal que está entrando en el surco (Q_e). En la medida de lo posible mantenga un caudal de entrada constante.
- Corte el suministro de agua una vez haya llegado al final del surco evaluado. Tenga en cuenta que si desea replicar la prueba en su plantación, debe simular las condiciones reales del riego y, por lo tanto, el corte del agua en la cabecera debe coincidir con el manejo dado por el regador o por la plantación.
- Apunte la hora en la que el agua empieza a escurrir en la canaleta instalada al pie del surco y el caudal (Q_s). Deberá realizar continuas observaciones anotando la misma información hasta que el caudal sea cero.

3. Registro de los tiempos de avance y receso

- Establezca puntos de observación a lo largo del surco cada 10 m o como considere más conveniente, y en cada uno coloque una banderilla.
- Anote el tiempo desde el inicio de la prueba en que el agua alcanza cada uno de los puntos de observación previamente establecidos, hasta que llegue al

final del surco. Estos son conocidos como tiempos de avance (T_a).

- Una vez realizado el corte del agua en la cabecera, proceda a registrar el tiempo en que el agua desaparece de la superficie del suelo en cada uno de los puntos de observación. A esto se le conoce como tiempo de receso (T_r).

En salón

1. Construcción de las curvas de avance y receso

- En cada punto de observación determine el *tiempo de oportunidad de contacto* (T_{oc}), a partir de la siguiente ecuación:

$$T_{oc} = T_r - T_a$$

- Grafique el tiempo de avance y receso, estableciendo en el eje de las abscisas la longitud, y el tiempo acumulado en el eje de las ordenadas.

2. Determinar el hidrograma de entradas y salidas, y el volumen infiltrado

- Calcule el volumen de agua que entró (V_e) y salió del surco (V_s). Para ello primero es necesario que establezca el tiempo Δt_j y la distancia ΔX_j observados para cada lectura de Q_e y Q_s en los puntos de evaluación, así:

$$\Delta t_j = t_j - t_i$$

$$\Delta x_j = x_j - x_i$$

Donde:

Δt_j = tiempo transcurrido entre dos puntos i-j (min)

t_j = tiempo acumulado en el punto j (min)

t_i = tiempo acumulado en el punto i (min)

ΔX_j = distancia entre el punto i-j (m)

X_j = distancia acumulada en el punto j(m)

X_i = distancia acumulada en el punto i (m)

- Una vez determinado Δt_j y ΔX_j , halle el **volumen de salida** (V_s) en cada punto de observación, así:

$$V_{s_j} = \frac{(Q_{s_j} + Q_{s_i})}{2} * 0,06 * \Delta t_j$$

Donde:

V_{s_j} = volumen de salida en el punto j (m^3)

Q_{s_j} = caudal de salida en el punto j (L/s)

Q_{s_i} = caudal de salida en el punto i (L/s)

0,06 = factor de conversión de L/s a m^3/min

Δt_j = tiempo transcurrido del punto 0 al punto 1 (min)

Finalmente sume los volúmenes de salida en todos los puntos de observación para determinar el total o la escorrentía de la prueba (V_s).

- Si el volumen de entrada (V_e) se mantuvo bastante constante en los tiempos de observación registrados durante la prueba, puede solamente hacer un promedio de los caudales y aplicar la siguiente fórmula:

$$V_e = \bar{Q}_e * 0,06 * \Delta T_{co}$$

Donde:

V_e = volumen de entrada (m^3)

\bar{Q}_e = promedio de los Q de entrada registrados en cada punto

0,06 = factor de conversión de L/s a m^3/min

ΔT_{co} = tiempo transcurrido hasta el corte del agua (min)

Si se observa gran variación en los caudales de entrada, lo mejor será determinarla como se hizo con los volúmenes de salida, y reemplazando Q_s y V_s por los valores de entrada Q_e y V_e , respectivamente.

- Calcule el **volumen de agua infiltrado** así:

$$V_{i_{hidrograma}} = V_e - V_s$$

- Si lo desea, puede construir con la información tomada de los caudales, *el hidrograma de entradas y salidas*. Para ello, en un gráfico establezca en el eje de las abscisas el tiempo acumulado (min), en el eje de las ordenadas el caudal (Lps) e ilustre los datos de Q_e y Q_s .

3. Construcción del patrón de infiltración

- Utilice la ecuación de infiltración dada por el facilitador. Recuerde que la forma general de esta es:

$$Z = Kt^a + f_0 t$$

Donde: Z es la lámina infiltrada, K y f_0 son constantes y t es el tiempo, que en este caso corresponde al T_{oc} de cada punto de observación, ya estimado en la instrucción.

- Calcule la lámina infiltrada en cada punto como se mencionó anteriormente.
- Dado que las ecuaciones de infiltración son modelos matemáticos, en algunos casos pueden sobre o subestimar las láminas infiltradas. Para verificar esto debe determinar el volumen infiltrado a partir de las láminas infiltradas (L_i) en cada punto de observación, así: 1) halle el área infiltrada (A_i), 2) sume todos los valores obtenidos, 3) calcule el volumen infiltrado y 4) establezca el factor de corrección (f_c) entre el volumen infiltrado (V_i) obtenido del hidrograma de entradas y salidas, y el V_i conseguido del patrón de infiltración, utilizando las siguientes ecuaciones:

$$A_{i_j} = \left(\frac{L_{i_j} + L_{i_i}}{2 * 1000} \right) * \Delta X_j$$

$$V_i = A_i * w$$

Si el V_i (*patrón de infiltración*) > V_i (*hidrograma*) entonces:

$$f_c = \frac{V_i \text{ (hidrograma)}}{V_i \text{ (patrón de infiltración)}}$$

Donde:

A_{ij} = área infiltrada en el punto j

L_{ij} = lámina infiltrada en el punto j (mm)

L_{i_j} = lámina infiltrada en el punto i (mm)

ΔX_j = distancia entre el punto i-j (m)

V_i = volumen infiltrado (m^3)

A_i = sumatoria de las áreas infiltradas en cada punto (m^2)

w = ancho del surco o separación entre surcos (m)*

* Cuando el surco presenta el cultivo dentro de estos, se utiliza el ancho del surco; por el contrario, si el surco no incluye dentro al cultivo se utiliza la separación entre surcos.

Finalmente, solo en caso de ser necesario se corrige la lámina infiltrada en cada punto con el factor de corrección f_c .

- Represente el patrón de infiltración en un gráfico donde el eje x es la longitud del surco evaluada, y el eje y es la lámina infiltrada en cada punto de observación. Para una mejor apreciación del dibujo puede establecer las láminas como valores negativos, donde el cero se asemeja a la superficie del suelo.

4. Determinación de las eficiencias y pérdidas

- Calcule la lámina bruta aplicada como:

$$Lb = \frac{60 * Q_e * Tco}{w * L}$$

Donde:

60 = factor de conversión

Lb = lámina bruta o lámina total aplicada (mm)

Q_e = caudal de entrada (Lps)

Tco = tiempo del corte o aplicación del agua (min)

w = ancho o separación entre surcos (m)

L = longitud del surco (m)

- Establezca las **pérdidas por escorrentía (P_e)**. Para ello primero es necesario determinar la lámina perdida por escorrentía así:

$$LEs = \frac{V_s}{w * L} * 1.000$$

Donde:

LEs = lámina perdida por escorrentía (mm)

V_s = volumen de salida o escurrido (m^3)

w = ancho o separación entre surcos (m)

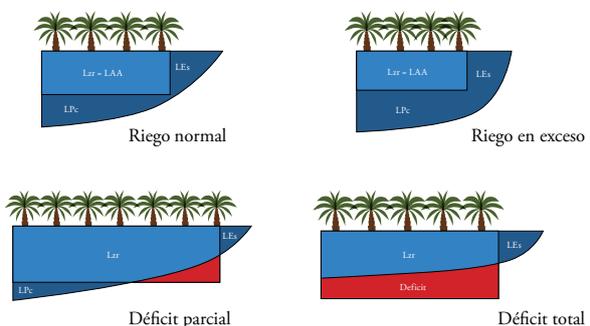
L = longitud del surco (m)

1.000 = factor de conversión

Luego, las pérdidas por escorrentía (PE) serán:

$$P_e (\%) = \frac{Lpe}{Lb} * 100$$

- Calcule la eficiencia de aplicación. Para ello debe determinar la lámina de agua almacenada en la zona de raíces (LZr). Ya que existen cuatro situaciones que pudieron ocurrir durante un riego: caso de riego normal, exceso, déficit parcial y total, se debe usar el gráfico de patrón de infiltración para hacerlo de manera adecuada.



En el caso de un riego normal y en exceso total, la $LZr = LAA$

En el caso de riego en déficit total, la $LZr = Li$

En los casos de riego en exceso o déficit parcial o en parte de la longitud del surco, deberá encontrar el o los puntos de intersección; es decir, la distancia x en la

que exactamente la lámina en zona de raíces es igual a la LAA, y determinar el área en la zona de raíces (AZr) correctamente regada, integrando por el método de trapecios el área sobre la curva.

Finalmente, la **eficiencia de aplicación (Ea)** puede ser expresada en términos de lámina, área y volumen, dando como resultado lo mismo:

$$Ea(\%) = \frac{LZr}{Lb} * 100 = \frac{AZr}{Ab} * 100 = \frac{\forall Zr}{\forall e} * 100;$$

$$AT = Lb + L$$

Donde:

Ea = eficiencia de aplicación (%)

LZr, *AZr*, *∀Zr* = lámina (mm), área (m²), y volumen (m³) almacenado en la zona de raíces.

AT = área total (m²)

L = longitud del surco (m)

Lb = lámina bruta (mm)

∀e = volumen de entrada (m³)

- Determine las **pérdidas por percolación profunda (Pp)** así:

$$Pp (\%) = 100 \% - Pe - Ea$$

Donde:

Pp = pérdidas por percolación profunda (%)

Pe = pérdidas por escorrentía (%)

Ea = eficiencia de aplicación (%)

- Halle la **eficiencia de almacenamiento (Eal)** como se expresa a continuación. Recuerde que también puede hacerlo en términos de área y volumen.

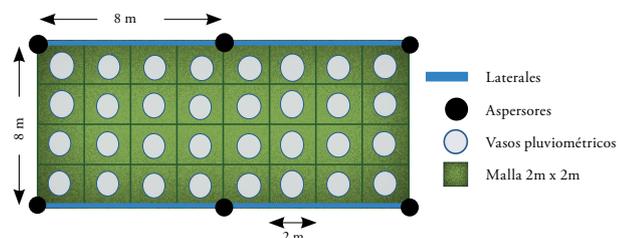
$$Eal (\%) = \frac{LZr}{LAA} * 100$$

Anexo 3. Material de apoyo para la evaluación de la eficiencia de uniformidad de un sistema de riego por aspersión

Procedimiento en campo

1. Instalación de recipientes y medición de volúmenes de agua recogida

- En el área seleccionada, instale los recipientes o vasos sobre el suelo, formando una malla de 2x2 metros entre dos laterales que recojan el agua de mínimo seis aspersores, como se muestra en la ilustración. Sin embargo, esta cantidad puede variar según el diseño del sistema a evaluar.



- De un orden y una numeración a cada vaso para garantizar que el registro del volumen de cada uno corresponda a su posición.
- En un área cercana a la prueba, pero que no esté mojada por el riego, ponga cinco vasos con un volumen de agua conocido para medir la evaporación en el tiempo de duración de la actividad.

- Una vez instalados los vasos, proceda con el riego durante una hora,
- Al finalizar la hora de riego, suspenda e inicie las mediciones del volumen de agua en cada vaso con ayuda de una probeta, y regístrelo en el Formato 6.

2. Chequeo de presiones y aforo volumétrico

- Mientras se lleva a cabo el riego, en un lateral cercano al sitio de la prueba, seleccione los aspersores de los extremos y dos de la parte media del lateral para chequear las presiones con ayuda de un manómetro de presión. Haga la lectura tres veces en cada aspersor y regístrela en el Formato 6.
- A los mismos aspersores seleccionados para el chequeo de presión, realícele el aforo volumétrico como se indica a continuación:

- » Conecte una manguera flexible directamente en la boquilla del aspersor para que la descarga sea en forma directa al recipiente.
- » Colecte la descarga del aspersor en un recipiente de volumen conocido (V), tomando en cuenta el tiempo (T) de llenado mediante un cronómetro. Repita esta operación tres veces y registre los datos en el Formato 6.
- » Calcule el caudal usando la ecuación:

$$Q(L/h) = \frac{V}{T}$$

