



# **EL AUTOR**José Ricardo Cruz Valderrama

Ingeniero agrícola con Maestría en Ciencia del Suelo y Manejo de Aguas, investigador del Programa de Agronomía de Cenicaña en el área de Suelos y Aguas. Obtuvo el título de ingeniero agrícola en 1976, en el programa dirigido por la Universidad del Valle y la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, y de inmediato se vinculó a la firma de consultores Guido Castañeda como auxiliar de diseño de obras hidráulicas. Entre 1977 y 1979 trabajó en el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) como asistente de la Superintendencia de Campo con funciones en adecuación, mecanización, riego, drenaje y manejo de cultivos. En 1979 inició su labor docente en la Universidad Nacional, sede Palmira, donde fue profesor titular del área de Suelos y Aguas.

En 1983 obtuvo una beca del gobierno de los Países Bajos para realizar estudios de Maestría en Ciencia del Suelo y Manejo de Aguas en la Universidad Agrícola de Holanda, en Wageningen, y en 1985 recibió el grado de Maestro en Ciencias (M.Sc.). El mismo año regresó a la Universidad Nacional como profesor del programa de Maestría en Suelos y Aguas. En 1988 se vinculó al Ingenio Central Castilla, donde fue jefe del Departamento de Ingeniería Agrícola y dirigió las áreas de adecuación de tierras, manejo de recursos hídricos, diseño y construcción de obras hidráulicas y vías. En 1992 se integró a Cenicaña como ingeniero de suelos y aguas, con labores de investigación y transferencia en el Programa de Agronomía.

# MANEJO EFICIENTE DEL RIEGO EN EL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR

EN EL VALLE GEOGRÁFICO DEL RÍO CAUCA



# MANEJO EFICIENTE DEL RIEGO EN EL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR

EN EL VALLE GEOGRÁFICO DEL RÍO CAUCA



Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia



Cruz Valderrama, José Ricardo

Manejo eficiente del riego en el cultivo de la caña de azúcar en el valle geográfico del río Cauca. / José Ricardo Cruz Valderrama. Cali: Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia, 2015.

192 p.; 28 cm.

ISBN: 978-958-8449-17-3

Incluye referencias bibliográficas

1. Caña de azúcar. 2. Agua. 3. Riego. 4. Lámina de agua rápidamente aprovechable (*LARA*). 5. Evaporación. 6. Evapotranspiración. 7. Medición. 8. Respuesta de la caña al agua. 9. Aforo. 10. Aforador RBC. 11. Riego por aspersión. 12. Riego con caudal reducido. 13. Riego por goteo. 14. Riego por surcos. 15. Recursos hídricos.

I. Título.

631.7 CDD 23 Ed.

C955

Cenicaña - Biblioteca Guillermo Ramos Núñez

### Publicación Cenicaña® © 2015

ISBN: 978-958-8449-17-3

### Dirección postal:

Calle 58 Norte 3BN-110. Cali, Colombia. Estación Experimental: vía Cali-Florida km 26 San Antonio de los Caballeros

Florida, Valle del Cauca, Colombia.

www.cenicana.org buzon@cenicana.org

Producción editorial: Servicio de Cooperación Técnica

y Transferencia de Tecnología, Cenicaña. **Fotografías:** Banco de imágenes, Cenicaña **Diseño y diagramación:** El Bando Creativo

Impresión: Ingeniería Gráfica

Primera edición Septiembre de 2015 Cali, Colombia

Todos los derechos reservados. Prohibida la reproducción total o parcial de este libro, por cualquier medio, sin permiso de Cenicaña. Advertencia: la mención de productos comerciales en las publicaciones de Cenicaña tiene solamente el propósito de ilustrar a los lectores acerca de las pruebas realizadas y, en ningún caso, compromete al Centro de Investigación con los fabricantes o distribuidores, quienes no están autorizados para usar los resultados con fines promocionales ni publicitarios.

### Cita bibliográfica:

Cruz Valderrama, J.R. 2015. Manejo eficiente del riego en el cultivo de la caña de azúcar en el valle geográfico del río Cauca. Cenicaña. Cali, Colombia. 192 p.



A todas las personas que aportaron a la realización de este libro, especialmente a:

Jorge Torres, exdirector del Programa de Agronomía, por sus valiosos consejos técnicos en el desarrollo científico de los proyectos en manejo de aguas.

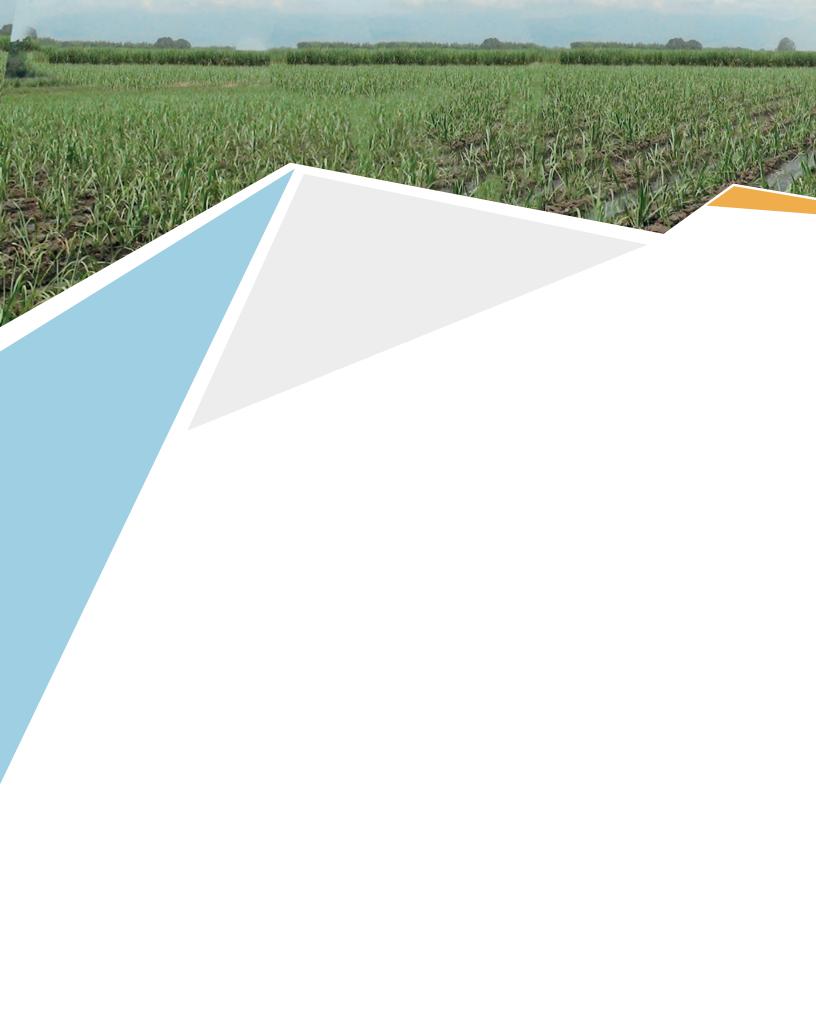
Javier Carbonell, por su apoyo decidido a este proyecto y la revisión de los capítulos 3 y 4.

Armando Campos, por la revisión del capítulo 1 y por facilitar sus notas de clase y algunas fotos de su colección.

Edgar Hincapié, por la revisión del capítulo 2 y por su colaboración con el esquema del lisímetro de pesaje.

Álvaro García y Francisco Millán, por su disciplina en el trabajo de campo en el área de suelos y aguas.

Álvaro Amaya, por su respaldo profesional desde la dirección de Cenicaña.





# CONTENIDO GENERAL

CAPÍTULO 1	Almacenamiento y disponibilidad de agua en suelos cultivados con caña de azúcar	12
CAPÍTULO 2	Requerimientos de agua y riego en el cultivo de la caña de azúcar	32
CAPÍTULO 3	Balance hidrológico de oferta y demanda de agua para riego en una unidad productiva	60
CAPÍTULO 4	Medición de agua de riego en el cultivo de la caña de azúcar	82
CAPÍTULO 5	Aplicación eficiente de riego en el cultivo de la caña de azúcar	112
ANEXOS		151
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		
LISTADO DE CUADROS		
LISTADO DE EJEMPLOS		
LISTADO DE FIGURAS		
LISTADO DE PROCEDIMIENTOS		





# **PRESENTACIÓN**

El agua es fundamental para las comunidades, la industria y la agricultura. Consciente de ello, el sector agroindustrial de la caña de azúcar de Colombia determinó, desde la fundación de Cenicaña en 1977, que una de sus prioridades de investigación era trabajar en el manejo del suelo y el agua para hacer un uso más eficiente del recurso hídrico e incrementar la producción de caña.

Entre los logros sobresalientes de este proceso están el balance hídrico priorizado para la programación técnica de los riegos, el riego por surco alterno, el uso de politubulares y tubería con compuertas, el control administrativo del riego, el riego por pulsos, el riego con caudal reducido, el riego por goteo de bajo costo y el ferti-riego de bajo costo. Estas tecnologías permiten un ahorro de agua del 50% y, actualmente, en las tierras donde han sido adoptadas, representan un beneficio ambiental de 600 millones de m³/año, aproximadamente.

Con el fin de facilitar la adopción de este conjunto de tecnologías, producto de 35 años de investigación, Cenicaña presenta a la comunidad cañicultora, ingenieros agrícolas, agrónomos, profesionales de los ingenios, la academia y personas interesadas en el tema, el libro "Manejo eficiente del riego en el cultivo de la caña de azúcar en el valle geográfico del río Cauca", como un aporte a la agricultura y al medio ambiente en Colombia.

Este libro propone acciones inmediatas y a corto plazo, algunas de ellas sin costo para el productor, con el objetivo de adaptar el riego a la variabilidad climática que se manifiesta en los periodos de sequía prolongados y afecta la disponibilidad de agua en las fuentes.

ÁLVARO AMAYA ESTÉVEZ

Director General Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia



Las investigaciones en el manejo de aguas han mostrado que si los agricultores adoptan las tecnologías desarrolladas, lograrán bajar los volúmenes de agua por hectárea en un 50%, cifra que puede representar cerca de  $8900~\text{m}^3/\text{ha/año}$ .

Este documento da cuenta de 35 años de investigación en riego, mediante un enfoque práctico que enfatiza los procedimientos paso a paso y los ejemplos de cálculo de los parámetros utilizados en la planeación, diseño, evaluación y mejoramiento del riego. Lo anterior con el fin de facilitar la adopción de las tecnologías y desarrollar programas de capacitación sobre el manejo eficiente del riego como un aporte a la agricultura y al medio ambiente de nuestro país.

En el capítulo 1, "Almacenamiento y disponibilidad de agua en suelos cultivados con caña de azúcar", se revisan las propiedades físicas del suelo relacionadas con el agua disponible para las plantas y el riego, así como las características predominantes de estas propiedades en el valle geográfico del río Cauca. Además, se tratan en detalle los procedimientos para determinar las funciones de infiltración con ejemplos ilustrativos y se recalca la relación que hay entre el contenido de agua del suelo y su disponibilidad para las plantas.

En el capítulo 2, "Requerimientos de agua y riego en el cultivo de la caña de azúcar", se presentan los resultados de investigación sobre este tema, así como los procedimientos para calcular los requerimientos de riego operativo y de largo plazo, y la respuesta de la caña al agua para determinar hasta dónde es rentable regar, de acuerdo con el régimen de precipitación en cada unidad productiva.



El capítulo 3, "Balance hidrológico de oferta y demanda de agua para riego en una unidad productiva", es básico para la planeación de riego en una finca y el mejoramiento de la gestión de riego.

El capítulo 4, "Medición de agua de riego en el cultivo de la caña de azúcar", explica los métodos de medición o aforo de agua de riego, con sus características hidráulicas más relevantes. Aunque se relaciona un amplio número de estructuras, el detalle sobre los procedimientos de diseño, calibración y uso, se presenta solo para las que se consideran más apropiadas en las condiciones del valle geográfico del río Cauca: el aforador RBC y la canaleta sin cuello.

Finalmente, en el capítulo 5, "Aplicación eficiente de riego en el cultivo de la caña de azúcar", se presentan los métodos de aplicación de riego, incluido el diseño de riego por surcos y la evaluación de los sistemas de riego por surcos y aspersión. El control administrativo del riego por aspersión con cañones se constituye en una novedad puesto que no se contaba con una metodología para evaluar este sistema. Se hace énfasis en las acciones de mejoramiento de estos métodos y se presentan avances y recomendaciones para la inversión rentable en tecnologías de riego más eficientes, entre ellas, el ferti-riego, el riego con caudal reducido, el riego por aspersión con pivote central y el riego localizado o por goteo de bajo costo.

Con este libro, se busca que los técnicos responsables del riego y los productores cuenten con una guía práctica de procedimientos para la solución inmediata de problemas de riego, mejorando el uso racional y sostenible de los recursos de agua y suelo, y la competitividad de nuestra región.



CON CAÑA DE AZÚCAR





# CONTENIDO

Introducción
Propiedades físicas de los suelos en el valle geográfico del río Cauca
Textura
Estructura
Porosidad
Densidad aparente y densidad real
Infiltración del agua en el suelo
Medición de la infiltración
Redistribución del agua en el suelo21
Almacenamiento y flujo de agua
Curva de retención de agua en el suelo
Agua aprovechable para las plantas (AA)27
Lámina de agua rápidamente aprovechable (LARA)

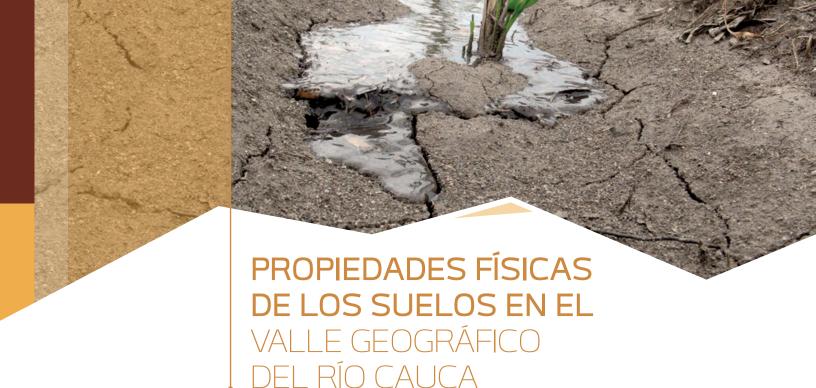


# INTRODUCCIÓN

El suelo corresponde al manto dinámico superficial de la corteza terrestre que ofrece agua, nutrimentos y anclaje mecánico a las plantas. Los suelos están integrados por partículas minerales, materia orgánica, agua y aire. Los espacios entre las partículas sólidas se denominan poros, donde se almacenan agua en solución y aire, los cuales son esenciales para el crecimiento de las plantas.

Con el propósito de hacer un manejo eficiente y sostenible del agua, tendiente a reducir los costos de riego en el cultivo de la caña de azúcar, y con el fin de que la planta la absorba y se desarrolle de forma óptima, con un mínimo de pérdidas que resulten costosas para el productor y afecten la disponibilidad del recurso hídrico para otros usuarios, es necesario entender no solo cómo entra el agua en el suelo, sino cómo se almacena y se mueve en su interior.

En este capítulo se revisarán las propiedades físicas del suelo relacionadas con el agua aprovechable para las plantas, así como las características predominantes de estas propiedades en el valle geográfico del río Cauca. Con este fin, se presentarán ejemplos prácticos sobre el movimiento del agua en el suelo y su disponibilidad para el cultivo, cuyo conocimiento es clave en el manejo óptimo del riego.



## **TEXTURA**

Se define como la proporción de los separados del suelo, los cuales están constituidos por partículas minerales (arcillas, limos y arenas), clasificadas de acuerdo con su tamaño: arcilla: < 0.002 mm; limo: 0.002 mm - 0.02 mm; arena fina: 0.02 mm - 0.02 mm; arena gruesa: 0.2 mm - 0.02 mm.

La textura está relacionada con el agua disponible en el suelo para las plantas y con la frecuencia de riego (Cuadro 1.1). La identificación de la clase textural se puede hacer de forma preliminar tomando una muestra pequeña de suelo que, una vez humedecida, se amasa entre el pulgar y el índice para observar cómo se rompe el molde (ver Anexo A.1). Cuando se requiera mayor precisión, existen métodos de laboratorio que miden la distribución de partículas por tamaño; entre otros, el de pipeta y el de Bouyoucos (González, 1980). De acuerdo con la información recopilada por Cenicaña (1981) y el estudio detallado de suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2006), la mayoría de los suelos del valle geográfico del río Cauca presenta texturas entre fina y media.

Relación entre la textura del suelo, el agua disponible para las plantas y la frecuencia de riego.

### SUELOS ARCILLOSOS

- Contenido de arcilla
   > 40%. Predominan en el valle geográfico del río Cauca.
- Poros muy pequeños (< 0.03 mm), pero con un volumen total alto.
- Alta capacidad de almacenamiento, pero no siempre alta disponibilidad de aqua.
- Riegos más espaciados en el tiempo, excepto en suelos que se agrietan.

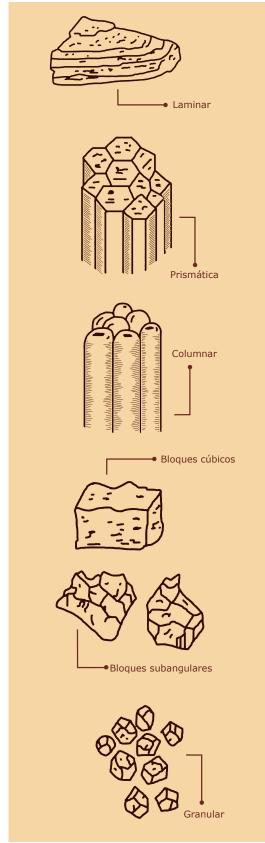
### **SUELOS FRANCOS**

- Igual proporción de arena, limo y arcilla.
- Poros de tamaño mediano (0.03 mm -0.1 mm).
- Moderada capacidad de almacenamiento y alta disponibilidad de agua.
- Riegos medianamente espaciados.

### **SUELOS ARENOSOS**

- Contenido de arena50%.
- Poros de tamaño grande (> 0.1 mm), pero con un volumen total bajo.
- Baja capacidad de almacenamiento de agua.
- Riegos frecuentes.

Figura 1.1 Tipos de estructuras frecuentes en suelos minerales.



Fuente: Adaptado de González (1980).

# **ESTRUCTURA**

Es la forma como se agrupan los agregados o terrones más pequeños del suelo. Puede ser laminar, prismática, columnar, esferoidal o granular y de bloques cúbicos y subangulares (Figura 1.1).

Los suelos en el valle geográfico del río Cauca presentan, en su mayoría, estructura bien desarrollada en forma de bloques sub-angulares que se caracterizan por agregados similares a bloques cuadrados o angulares con los bordes ligeramente pronunciados (IGAC, 2006). La presencia de bloques relativamente grandes indica que el suelo resiste la penetración y el movimiento de agua (baja permeabilidad) y, por lo general, se encuentran en el horizonte B cuando hay acumulación de arcillas.

El laboreo excesivo conduce a cambios en la estructura de los suelos, que afectan no solo el movimiento y la cantidad de agua que almacenan para suplir los requerimientos de los cultivos, sino la densidad aparente, la porosidad y la distribución de poros.

# **POROSIDAD**

Dentro de los agregados del suelo existen espacios vacíos o poros en los cuales se almacenan agua, aire y gases. Los poros se clasifican en microporos (< 0.03 mm), mesoporos (0.03 mm - 0.1 mm) y macroporos (> 0.1 mm). La porosidad del suelo (Pt) se define como la relación entre el volumen total de poros y el volumen de suelo.

$$Pt = \left(\frac{Vtp}{Vt}\right) * 100$$

### Donde:

- Pt: porosidad total del suelo (%)
- Vtp: volumen total de poros en el suelo (cm<sup>3</sup>) = Vt Vss



Suelo franco arcilloso aumentado 4X.

- Vt: volumen total de suelo (cm<sup>3</sup>)
- Vss: volumen de suelo seco (cm<sup>3</sup>)

La porosidad del suelo, que varía entre 30% y 60%, y la distribución del tamaño de poros influyen sobre el almacenamiento, la disponibilidad y el movimiento del agua.

Tanto la textura como la estructura del suelo son determinantes en la porosidad y, por ende, en la entrada, el movimiento y la disponibilidad de agua, así como en la capacidad potencial del suelo para suministrar nutrientes a las plantas. Cada uno de estos factores está ligado directa o indirectamente al tamaño y distribución del espacio poroso y a las fuerzas de atracción entre los sólidos y el agua en el suelo.

De acuerdo con el estudio detallado de suelos del IGAC (2006), los suelos en la zona azucarera del valle geográfico del río Cauca presentan rangos estrechos de agua aprovechable, que corresponden a una capacidad de retención de humedad aproximada de 2 mm de agua por cada centímetro de profundidad en el perfil del suelo.



EL ALMACE-NAMIENTO Y LA DISPONI-BILIDAD DE AGUA DEPENDEN DE LA TEXTURA, ES-TRUCTURA Y POROSIDAD DEL SUELO.

# DENSIDAD APARENTE Y DENSIDAD REAL

La densidad aparente (*Da*) es la relación entre el peso de suelo seco y el volumen total de suelo, incluyendo volumen de sólidos y poros del suelo.

$$Da = \frac{Mss}{Vt}$$

# Donde:

- Mss: masa del suelo seco (g)
- Vt: volumen total del suelo (cm<sup>3</sup>)

Algunos valores de referencia para la *Da* de diferentes tipos de suelo son los siguientes:

- Alto contenido de materia orgánica:
   0.5 g/cm<sup>3</sup>
- Arcillosos o limosos no compactados:
   1.0 1.3 g/cm<sup>3</sup>
- Alto contenido de arena: 1.6 g/cm<sup>3</sup>
- Compactados por sobrelaboreo:
   1.6 1.7 g/cm<sup>3</sup>

La densidad real (*Dr*) del suelo es la relación entre el peso y el volumen de suelo seco o volumen de sólidos del suelo.

$$Dr = \frac{Mss}{Vss}$$

### Donde:

- Mss: masa del suelo seco (g)
- Vss: volumen de suelo seco (cm<sup>3</sup>)

El valor más común para la Dr de los suelos minerales es de 2.65 g/cm<sup>3</sup> (2650 kg/m<sup>3</sup>).

Conocidas la *Da* y la *Dr* es posible calcular la porosidad total (*Pt*), de la siguiente forma:

$$Pt = \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) * 100$$

# **INFILTRACIÓN DEL** AGUA EN EL SUELO

# Figura 1.2 Zonas de humedad en el perfil del suelo después de un tiempo de iniciado un riego o una lluvia fuerte.

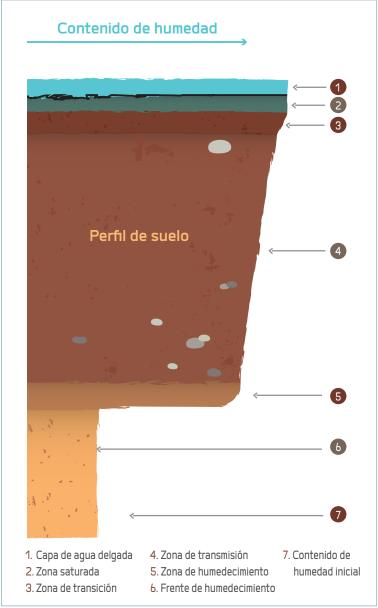
La infiltración es el paso del agua a través de la superficie del suelo. Al penetrar el agua en el perfil de suelo, cambia la distribución del contenido de humedad de acuerdo con la profundidad. La infiltración de agua es de gran importancia práctica para el diseño del riego, puesto que las fallas en la consideración adecua-

da de este proceso pueden generar una distribución no uniforme de agua en el campo, así como pérdidas de agua debidas a percolación y escorrentía (Smith y Warrick, 2007).

La velocidad de infiltración se denomina también tasa de infiltración y es fundamental en el diseño de sistemas de riego, específicamente, en la determinación del caudal que se debe utilizar, el tiempo de riego, la intensidad de aplicación (riego por aspersión) y en el caso de riego por goteo la separación entre goteros y el porcentaje de suelo humedecido en riego por goteo.

Según Koorevaar et al. (1983), después de un período de tiempo de iniciarse el riego o la lluvia, se pueden observar zonas con diversos contenidos de humedad (Figura 1.2), así:

- Saturada: zona superficial delgada (1 cm - 5 cm) con alto contenido de humedad que depende de la duración del riego o la lluvia.
- De transición: zona de reducción del contenido de humedad localizada entre la zona saturada y la casi saturada de transmisión. Su límite inferior puede alcanzar desde unos pocos milímetros (3 mm a 5 mm) hasta unos pocos centímetros (3 cm a 5 cm) de profundidad.
- De transmisión: zona de transporte para el agua infiltrada. Mientras las demás zonas conservan un espesor constante, esta se extiende hacia abajo a medida que el suministro de agua continúa en la superficie del suelo. Aunque el contenido de humedad puede cambiar levemente con la profundidad, por lo general, es constante y cercano al punto de saturación.



Fuente: Adaptado de Koorevar et al. (1983).

- De humedecimiento: zona delgada donde el contenido de humedad cambia desde un valor inicial hasta el valor en la zona de transmisión.
- Frente de humedecimiento: límite visible de penetración del agua en el perfil de suelo.

La cantidad de agua que se infiltra es función de la velocidad, la cual, a su vez, depende de la textura, el contenido de humedad inicial, la estructura y la permeabilidad del suelo. La velocidad de infiltración disminuye en función del tiempo de aplicación de agua hasta alcanzar un valor casi constante, denominado velocidad de infiltración básica (Figura 1.3).

La infiltración acumulada es la cantidad de agua total (en milímetros) que entra al suelo durante el riego. La tasa aumenta rápidamente al comienzo para luego disminuir en función del tiempo (Figura 1.4). El tiempo necesario para que un suelo absorba una determinada cantidad de agua se calcula a partir de la función de infiltración acumulada.

El agua infiltrada se mueve más rápido en suelos más permeables, con poros grandes y continuos, y más lento en suelos menos permeables con poros de menor tamaño y continuidad.

# MEDICIÓN DE LA INFILTRACIÓN

La infiltración depende de varios factores, por lo tanto, es difícil su estimación confiable e imposible de obtener una relación única entre todos los parámetros que la constituyen. Entre los métodos comunes para la medición del agua en el suelo se encuentran: los anillos infiltrómetros, el avance de agua en surcos y el surco bloqueado. Los métodos para la medición de infiltración, los procedimientos para determinar las funciones de infiltración, y la aplicación práctica de estas funciones en el riego se incluyen en el Anexo A.2.



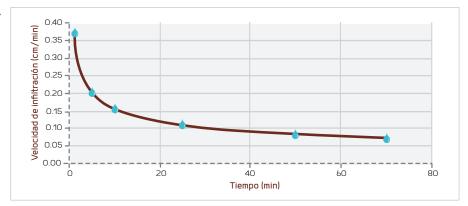
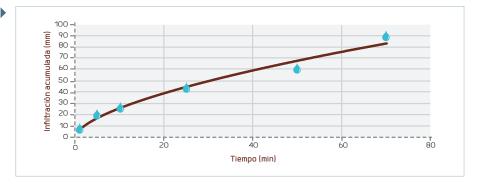


Figura 1.4
Infiltración
acumulada
en función
del tiempo de
aplicación
de agua.



# **REDISTRIBUCIÓN** DEL AGUA EN EL SUELO

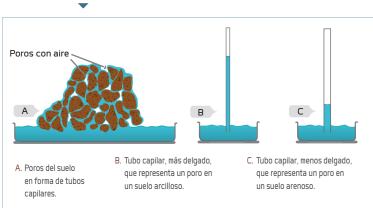
De acuerdo con Smith y Warrick (2007), luego de la suspensión de la infiltración a causa de un riego o una lluvia, el proceso continúa con la redistribución del agua dentro del suelo hasta que el potencial de agua sea uniforme a través del perfil. El agua que se encuentra en la parte superior del frente de humedecimiento comienza a drenar debido a la fuerza de gravedad, y el suelo de la parte inferior del frente de humedecimiento empieza a mojarse.

Después de algún tiempo, el suelo por debajo del frente de humedecimiento original, que fue humedecido primero, también se seca. En este punto, se presenta la capacidad de campo, que se define como el contenido de humedad en el suelo cuando la percolación profunda se detiene tras haber sido humedecido completamente por la aplicación de un riego pesado (lámina de agua > 80 mm), una lluvia fuerte (> 50 mm) o varias lluvias seguidas.

# ALMACENAMIENTO Y FLUJO DE AGUA

El agua es retenida por las fuerzas de cohesión entre sus moléculas y las de adhesión a los sólidos del suelo, dando origen a la tensión superficial que influye en la formación de los meniscos o superficies curvas en las interfaces agua-aire dentro del suelo.

Figura 1.5 Poros que se forman entre las partículas de suelo. Los poros que se forman entre las partículas de suelo se asemejan a tubos capilares por los que asciende el agua y queda retenida; por esta razón, se hace



referencia a presión o succión capilar (Figura 1.5).

En un suelo no saturado, el agua está sometida a presiones negativas; por consiguiente, su energía potencial en el suelo también es negativa, lo que se manifiesta en el trabajo que les implica a las plantas para extraerla.

La energía potencial mide la capacidad de un sistema para desempeñar un trabajo, en función de su posición o configuración. En el caso del agua, esta energía denominada potencial de agua es considerada como la energía almacenada por el agua o como una medida de la capacidad relativa del agua para efectuar un trabajo.

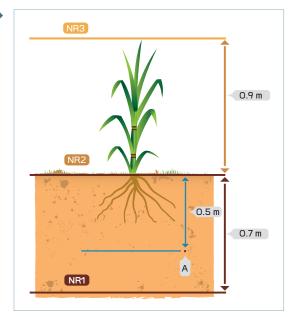
En un suelo saturado, donde el agua ocupa todo el espacio poroso, el potencial total de agua (Pt) es la suma de los potenciales gravitacional (Pg), de presión (Pp) y osmótico (Po). En un suelo no saturado, donde el agua ocupa parte

del espacio poroso total, el potencial total de agua (Pt) es la suma de los potenciales gravitacional (Pg), mátrico (Pm) y osmótico (Po).

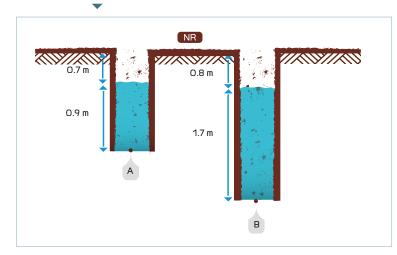
El potencial gravitacional del agua (*Pg*) es independiente de la condición del suelo; solo depende de la posición con respecto a un nivel de referencia (*NR*), así:

- Pg > 0 cuando el punto está por encima del NR(+)
- Pg < 0 cuando el punto está por debajo del NR(-)
- Pg = 0 cuando el punto coincide con el NR

Figura 1.6 Cálculo del Pg en el suelo en el punto A, respecto al nivel de referencia NR1.



Pp en un suelo saturado y datos para el cálculo del Pt respecto al nivel de referencia (NR).



En la Figura 1.6 se ilustra el potencial gravitacional (Pg) en el punto A con respecto al nivel de referencia NR1, siendo igual a la distancia vertical entre NR1 y A = 0.7 m - 0.5 m = 0.2 m. De la misma manera, el Pg en el punto A respecto a NR2 = -0.5 m, y el Pg en A con respecto a NR3 = -0.9 m - 0.5 m = -1.4 m.

Por otra parte, el potencial mátrico del agua en el suelo (Pm) es aquel que está asociado con la retención de agua por parte de la matriz del suelo, la cual está conformada por las partículas sólidas del mismo. Este potencial solo se presenta en suelos no saturados y siempre es negativo, por lo que algunos autores prefieren hablar de la tensión de humedad del suelo (THS), que no es más que el potencial mátrico con signo negativo (THS = -Pm).

En suelos saturados, en lugar del potencial mátrico, se manifiesta el potencial de presión (*Pp*), que siempre es positivo y corresponde a la presión de la columna de agua por encima de un punto dado dentro del suelo, tal como se muestra en la Figura 1.7. El potencial de presión y el potencial mátrico son mutuamente excluyentes.

En la Figura 1.7 se observa que el potencial de presión (*Pp*) en el punto A corresponde a la altura de la columna de agua sobre dicho punto, o sea, 0.9 metros, mientras que el potencial de presión en el punto B es igual a 1.7 metros.

El potencial osmótico (*Po*), otro componente del potencial total de agua en el suelo, está asociado con la presencia de sales en la solución. En la Figura 1.8 se observa un tanque dividido en dos partes por una membrana semipermeable; en el lado izquierdo de la membrana se tiene una solución salina, y en el derecho, agua pura. Como resultado de la mayor concentración de moléculas de agua en el lado derecho, esta se moverá hacia la parte izquierda donde es mayor la concentración de sales.

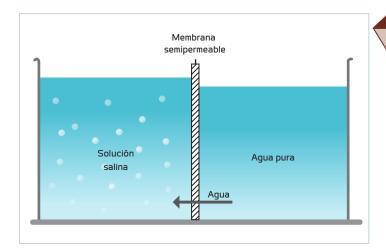


Figura 1.8
Concepto
de presión
osmótica de
agua en el
suelo.

El Po es de especial importancia en suelos salinos ya que constituye el principal obstáculo para la absorción de agua por parte de las plantas, lo que afecta la producción en los cultivos.

La fuerza conductora del movimiento de agua en el suelo es el gradiente de energía potencial de agua. Esta energía permite identificar fácilmente la dirección del flujo; así, cuando dos suelos con el mismo contenido de humedad se ponen en contacto, el agua fluirá de la zona de mayor potencial hacia la de menor potencial, y el flujo de agua cesará cuando ambos potenciales se igualen. Normalmente, los potenciales de agua en el suelo se pueden expresar como:

- 1. Trabajo por unidad de peso: en términos de la altura de una columna de agua (m, cm o mm).
- 2. Trabajo por unidad de volumen: en términos de unidad de presión como dina/cm², bar, atmósfera, pascal, etc.
- **3.** Trabajo por unidad de masa: en términos de ergios/g, joules/kg, etc.

# Figura 1.9 Cálculo del potencial total de agua (Pt) en un suelo no saturado.

# EJEMPLO

# Cálculo del potencial total de agua en un suelo no saturado

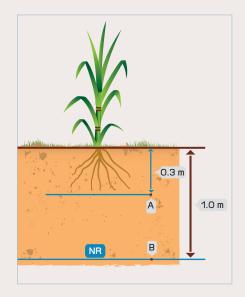
En el punto A de la Figura 1.9, la tensión de humedad del suelo (THS) es de 51.65 m = 5 atmósferas (1 atmósfera (at) = 10.33 m), y en el punto B, la THS es de 10.33 m (1 at). Para determinar el potencial total de agua y la dirección de agua entre ambos puntos, inicialmente, se debe recordar que, en un suelo no saturado, el potencial total de agua (Pt) es:

$$Pt = Pg + Pm = Pg - THS$$

### Donde:

- Pg: potencial gravitacional
- Pm: potencial mátrico: -THS
- Pg en A respecto al nivel de referencia
   (NR): 1.0 m 0.3 m = 0.7 m
- Pg en B respecto a NR: 0
- Pt en A: 0.7 m 51.65 m = -50.95 m
- Pt en B: 0 m 10.33 m = -10.33 m

Por tanto, el potencial total de agua es mayor en el punto B, y el agua se moverá hacia el punto A.



# **EJEMPLO**

# Cálculo del potencial total de agua en un suelo saturado

En este caso, partiendo de la Figura 1.7, se trata de un suelo saturado donde es necesario conocer el potencial total y la dirección del flujo de agua entre los puntos A y B. En estos suelos, el potencial total del agua (*Pt*) se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$Pt = Pq + Pp$$

### Donde:

Pg en A con respecto al nivel de referencia (NR):
-0.7 m - 0.9 m = -1.6 m Pg en el punto B respecto al NR:
-0.8 m - 1.7 m = -2.5 m

• Pp en el punto A: 0.9 m

• *Pp* en B: 1.7 m

• Pt en A: -1.6 m + 0.9 m = -0.7 m

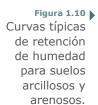
• Pt en B: -2.5 m + 1.7 m = -0.8 m

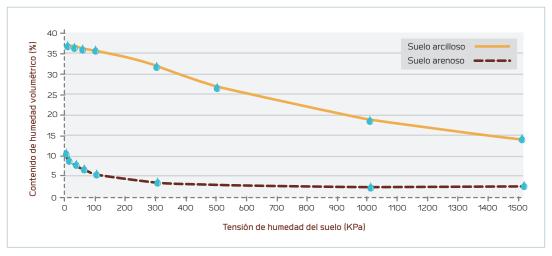
Por consiguiente, teniendo en cuenta que el agua se mueve de un punto de mayor energía potencial a un punto de menor energía, el movimiento del agua es del punto A hacia el B.

# CURVA DE RETENCIÓN DE AGUA EN EL SUELO

La curva de retención de agua en el suelo indica de manera gráfica la relación entre la tensión de humedad del suelo (*THS* = potencial mátrico con signo negativo) y el contenido de humedad gravimétrico (*CHg*) o volumétrico (*CHv*) (Figura 1.10). Para determinar esta curva, se somete una muestra de suelo a

diferentes tensiones y para cada una de ellas se mide el contenido de humedad correspondiente. Los valores de *THS* que se usan normalmente son: 10, 30, 60, 100, 300, 500, 100 y 1500 kPa (kilopascal), equivalentes, respectivamente, a 0.1, 0.3, 0.6, 1, 3, 5, 10 y 15 at (1 at = 100 kPa).





La *THS* se puede expresar en unidades de presión como la atmósfera (at), el bar (bar) o en unidades de columna de agua como el metro (m) y el centímetro (cm). Teniendo en cuenta que la *THS* expresada en centímetros puede alcanzar valores de miles, se creó la unidad de pF que equivale al logaritmo base 10 de la *THS* (en centímetros). La *THS* se puede medir utilizando instrumentos como los tensiómetros y los platos de presión (Figura 1.11).

A. Tensiómetro utilizado en campo.
B. Olla y plato de presión para determinar la curva de retención de agua del suelo.





# **EJEMPLO**

# Cómo obtener la curva de retención de agua del suelo

Como ejemplo, se utiliza un suelo de la consociación Manuelita (Fluventic Haplustolls), familia textural francosa fina, que ocupa un área significativa en el valle geográfico del río Cauca. En el Cuadro 1.2 se encuentran los valores del contenido de humedad gravimétrico (*CHg*) en función de la tensión de humedad del suelo (*THS*, en kPa) para este suelo.

Cuadro 1.2 Valores de THS y CHq en	THS (kPa)	CHg (%)	THS (kPa)	CHg (%)
un suelo de la	10	32.47	500	19.37
consociación	30	26.72	1000	19.80
Manuelita.	100	25.46	1500	14.97

La representación de estos valores aparece en la Figura 1.12.

Figura 1.12 Curva de retención de agua en un suelo Manuelita.



A partir de los datos de la Figura 1.12, se genera la ecuación de la línea de mejor ajuste:

$$CHq = 43.983 * THS^{-0.132}$$

Con esta ecuación es posible calcular los contenidos de humedad gravimétrica a otras tensiones, entre ellas, 30 kPa, que corresponde a la capacidad de campo (*CC*), y 1500 kPa, que equivale al punto de marchitez permanente (*PMP*). Es necesario tener en cuenta que cuando se utiliza un tensiómetro para medir directamente la *THS* de un suelo de la zona azucarera de Colombia, la columna capilar se rompe a tensiones próximas a 80 kPa. En estos casos, el contenido de humedad gravimétrico que corresponde a esta tensión se puede calcular utilizando la misma ecuación:

$$CHg = 43.983 * TSH^{-0.132} = 43.983 * 80 \text{ kPa}^{-0.132} = 24.66\%$$

Si el interés es determinar el contenido de humedad gravimétrico (*CHg*) a capacidad de campo (*CC*), asumiendo que la tensión correspondiente a este punto es de 30 kPa, entonces:

$$CHq = 43.983 * TSH^{-0.132} = 43.983 * 30 \text{ kPa}^{-0.132} = 28.07\%$$

El punto de marchitez permanente (PMP) será:

$$CHg = 43.983 * TSH^{-0.132} = 43.983 * 1500 \text{ kPa}^{-0.132} = 16.75\%$$

La CC y el punto de marchitez permanente (PMP) se denominan constantes de humedad del suelo, y con estos valores se define el agua aprovechable (AA) para las plantas.

# AGUA APROVECHABLE PARA LAS PLANTAS (*AA*)

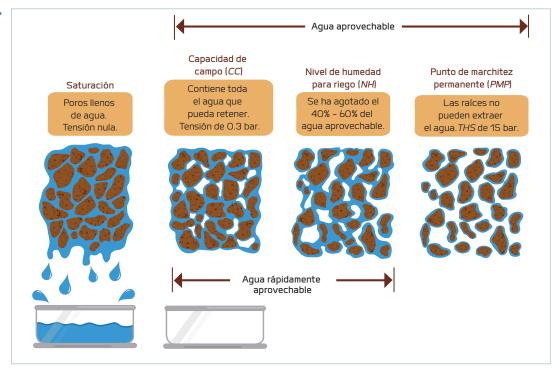
Durante el proceso de humedecimiento del suelo, como resultado de la precipitación o el riego, se puede observar que a medida que entra el agua (infiltración) va llenando los poros y desplazando el aire. Cuando todos los poros están llenos de agua, el suelo queda saturado. En este punto, las fuerzas de retención son nulas y el valor del potencial mátrico es igual a cero (Figura 1.13).

Una vez se suspende el proceso de infiltración, comienza el proceso de redistribución, inicialmente con predominio de la fuerza de gravedad que obliga la salida del agua de los macroporos (partículas con diámetro > 0.1 mm). Así se obtiene un valor de contenido de humedad conocido como capacidad de campo (*CC*). Por lo general, se toma como capacidad de campo el contenido de humedad que retiene un suelo bien drenado entre

1 y 2 días después del riego, cuando prácticamente ha cesado el flujo de agua gravitacional. El potencial mátrico de agua en ese momento corresponde a un valor que, dependiendo de la textura del suelo, varía entre –10 kPa y –33 kPa (es decir, entre –0.10 bar y –0.33 bar). El valor de la capacidad de campo se considera el límite superior de la capacidad de almacenamiento de agua del suelo.

La capacidad de campo de un suelo es afectada por los cambios en la textura y en la estructura en los diferentes horizontes del perfil, y depende de las condiciones en cada sitio; por tanto, se recomienda determinarla directamente con muestreos en campo, como se describe en la Guía metodológica de control administrativo del riego (Cruz, 2014), publicada por Cenicaña.

Constantes
de humedad
del suelo
que definen
el agua
aprovechable
y el agua
rápidamente
aprovechable.



Fuente: Adaptado de Torres et al. (2004).

A medida que las plantas absorben agua, esta se va confinando en los poros más pequeños del suelo hasta llegar a un límite inferior de almacenamiento donde las plantas no pueden tomar suficiente agua y se marchitan. Por consiguiente, antes de alcanzar este estado, es necesario aplicar riego para no afectar el desarrollo y la producción del cultivo. El límite inferior de la humedad aprovechable se conoce como punto de marchitamiento permanente (*PMP*), y está asociado con un potencial mátrico de –1500 kPa, equivalente a –15 bar.

Aunque no es el mejor criterio, con el contenido de humedad del suelo es posible no solo describir la disponibilidad de agua para las plantas, sino determinar los requerimientos de agua y manejo del riego a nivel comercial.

La disponibilidad de agua para las plantas se relaciona con el agua aprovechable (AA), que corresponde a la cantidad de agua retenida por el suelo en el rango entre capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente.

# **EJEMPLO**

# Cálculo del agua aprovechable en el suelo

Si el contenido de humedad gravimétrico a capacidad de campo (*CCg*) es de 28.07%, y el punto de marchitez permanente (*PMPg*) es igual a 16.75%, el contenido de humedad gravimétrico retenido por el suelo en el rango entre la capacidad *CCg* y *PMPg*, o agua aprovechable gravimétrica (*AAg*), será:

$$AAg = CCg - PMPg = 28.07\% - 16.75\% = 11.32\%$$

Si la densidad aparente de este suelo es  $Da = 1.52 \text{ g/cm}^3$ , el contenido de humedad volumétrico retenido por el suelo (agua aprovechable volumétrica, AAv), se calculará así:

$$AAv = 11.32\% * 1.52 \frac{g}{cm^3} = 17.21\%$$

Cuando este valor de agua aprovechable en el suelo se expresa en términos de lámina, se denomina lámina de agua aprovechable (LAA) y se calcula de la siguiente forma:

$$LAA = AAv * Pr$$

### Donde:

- AAv: agua aprovechable volumétrica expresada en fracción decimal, o sea: AAv (%)/100.
- Pr: profundidad efectiva de raíces de un cultivo (cm).

En este ejemplo, si Pr = 60 cm, se tiene:

$$LAA = \left(\frac{17.21\%}{100}\right) * 60 \text{ cm} = 10.33 \text{ cm} = 103.3 \text{ mm}$$

De acuerdo con Cenicaña (Torres et al., 2004), los suelos en el valle geográfico del río Cauca presentan un rango de agua aprovechable que varía entre 1 mm y 4 mm por cada centímetro de profundidad en el perfil. En 1980, Cenicaña inició el estudio sobre las características hídricas de los suelos más representativos de la zona azucarera de Colombia; y, en 2006, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2006) entregó el estudio detallado de suelos. La información recopilada en estos estudios indica que los suelos, en su mayoría, presentan texturas entre media y fina, estructura bien desarrollada en forma de bloques subangulares y rangos estrechos de agua aprovechable que corresponden a una capacidad de retención de humedad aprovechable de alrededor de 2 mm de agua por cada centímetro de profundidad en el perfil del suelo.



Calicata para describir el perfil de suelo.



EN SUELOS
ARCILLOSOS,
EL FACTOR
DE AGOTAMIENTO
PERMISIBLE
DEL AGUA
APROVECHABLE DEBE
TENER UN
VALOR
DE 40%.

# LÁMINA DE AGUA RÁPIDAMENTE APROVECHABLE (*LARA*)

Cuando el contenido de humedad en el suelo presenta un valor cercano a la capacidad de campo (CC), el agua es absorbida fácilmente por las raíces, y la planta puede transpirar a su capacidad potencial. No obstante, cuando el agua aprovechable en el suelo se reduce, es retenida con mayor fuerza y las plantas deben esforzarse para extraerla. Es así como ocurre la evapotranspiración a una tasa menor que la potencial; esto se denomina evapotranspiración actual (ET).

Dentro del rango de disponibilidad de agua se encuentra el nivel crítico de humedad (*NH* crítico), a partir del cual se empieza a afectar el ritmo de crecimiento de los tallos de la caña de azúcar. Como regla general, el punto de referen-

cia para la aplicación de riego es aquel en el cual se ha consumido el 50% del agua aprovechable, y se conoce como factor de agotamiento permisible (*Fag*, en %). En estudios realizados en Cenicaña, se reveló que en suelos arcillosos, que se agrietan notablemente cuando se secan, el *Fag* del agua aprovechable debe tener un valor de 40%.

El agua almacenada en el suelo entre CC y NH se denomina agua rápidamente aprovechable (ARA), y cuando este valor se expresa en términos de lámina, se le llama lámina de agua rápidamente aprovechable (LARA), la cual se calcula de la siguiente forma:

$$LARA = LAA * \frac{Fag}{100}$$

Por tanto, la fórmula completa para calcular LARA (mm) de un suelo es:

$$LARA = \left(\frac{CCg - PMPg}{100}\right) * Da * Pr * \frac{Fag}{100} * 10$$

Donde:

• CCg: capacidad de campo gravimétrica (%).

• PMPg: punto de marchitez permanente gravimétrico (%).

• Da: densidad aparente del suelo (g/cm<sup>3</sup>).

• Pr: profundidad efectiva de raíces de un cultivo (cm).

• Fag: factor de agotamiento permisible del agua aprovechable (%).

# **EJEMPLO**

# Cálculo de la LARA

Con base en los datos que aparecen a continuación se realiza el cálculo de la *LARA* de un suelo.

CCg: 28.07%
 PMPg: 16.75%
 Da: 1.52 g/cm<sup>3</sup>

*Pr*: 60 cm*Fag*: 50%

Cálculo de la LARA aplicando la ecuación anterior:

$$LARA = \left(\frac{28.07\% - 16.75\%}{100}\right) * 1.52 \frac{g}{cm^3} * 60 \text{ cm} * \frac{Fag}{100} * 10 = 51.63 \text{ mm}$$

En la Guía metodológica de control administrativo del riego (Cruz, 2014), se encuentra el procedimiento para determinar la *LARA* de un suelo. Como una aproximación se puede usar el Apéndice técnico 2 de dicha guía, donde se explica cómo estimar el porcentaje de humedad aprovechable.

En los suelos de piedemonte y en los cordones de arena de la zona plana del valle geográfico del río Cauca, son comunes los altos contenidos de material rocoso (pedregoso) que afectan la lámina de agua aprovechable y, en esa misma proporción, la *LARA*. En estos casos, para el cálculo de la *LARA*, partiendo de la ecuación general, es necesario descontar el contenido volumétrico de piedra (*Cp*), de la siguiente manera:

$$\left(\frac{CCg - PMPg}{100}\right) * Da * Pr * \frac{Fag}{100} * 10 * (1 - Cp)$$

Donde *Cp* es el contenido volumétrico de piedra expresado como fracción decimal.

EJEMPLO

# Cálculo de la *LARA* en un suelo con alto contenido de piedra

En un suelo Nima (Entic Haplustolls) de textura franco fina sobre esquelética arenosa, después de describir el perfil, se encuentra que en el primer horizonte de 40 cm de profundidad, el suelo tiene una *CCg* de 23%, un *PMPg* de 10%, una *Da* de 1.36 g/cm³ y un *Cp* de 26%. En el segundo horizonte, por debajo de 40 cm, el contenido de piedra alcanza valores entre 35% y 80%, lo cual limita la profundidad de las raíces de la planta de caña de azúcar hasta esa profundidad. En estas condiciones, aplicando la ecuación anterior, la *LARA* se calcula de la siguiente forma:

$$LARA = \left(\frac{23\% - 10\%}{100}\right) * 1.36 \frac{g}{cm^3} * 40 \text{ cm} * \left(\frac{50\%}{100}\right) * (1 - 0.26) = 26.17 \text{ mm}$$



EN LOS PRIMEROS 40 cm DEL SUELO SE CONCENTRAN ENTRE 85% Y 92% DE LAS RAÍCES DE LA CAÑA. En 2009, a partir del "Estudio detallado de suelos y capacidad de uso de las tierras sembradas con caña de azúcar localizadas en el valle geográfico del río Cauca" (IGAC, 2006) y las propiedades físicas de los suelos determinadas en los experimentos de manejo de aguas, Cenicaña estimó las láminas de agua rápidamente aprovechable (*LARA*) para 179 suelos que representan 213,675 ha del valle geográfico del río Cauca (ver Anexo A.3).

Los resultados muestran que, en la región, la LARA presenta valores medios de 1.0 mm/cm de profundidad en suelos de textura fina, y de 0.8 mm/cm de profundidad en suelos de textura media. Por otra parte, en la profundidad radical efectiva, los valores medios encontrados por Cenicaña son de 30 cm en cañas menores de 2 meses, 50 cm en edades entre 2 y 4 meses, y 70 cm en cañas mayores de 4 meses. Además, las evaluaciones directas del patrón de crecimiento y distribución de las raíces de la planta de caña en campo mostraron que en los primeros 40 cm del suelo se concentran entre 85% y 92% de las raíces. En consecuencia, para calcular la LARA, se puede tomar una profundidad radical entre 40 cm y 60 cm antes de los 4 meses, que corresponde al período inicial de desarrollo, y entre 60 cm y 80 cm para el período de rápido crecimiento (4 a 10 meses). Los riegos suplementarios dependen de la precipitación, y se recomienda aplicarlos cuando se consume entre el 40% y el 60% del agua aprovechable. En suelos arcillosos que se agrietan, se sugiere usar un factor de agotamiento del 40%.

De acuerdo con los resultados anteriores, los promedios de los valores de la *LARA* en los suelos de textura fina que predominan en la zona son de 30 mm en plantaciones de caña menores de 2 meses, 50 mm entre 2 y 4 meses y 70 mm cuando son mayores de 4 meses de edad.





Introducción	= 3	35
Absorción de agua por las plantas		36
Requerimiento de agua de un cultivo		38
Evaporación		38
Transpiración		39
Evapotranspiración (ET)		39
Evapotranspiración de referencia (ETo)		39
Requerimiento de agua de la caña de azúcar	, °.	41
Requerimiento de riego en el cultivo de la caña de azúcar		43
Determinación de la precipitación efectiva		
Cálculo del requerimiento de riego		48
Respuesta de la caña de azúcar a la aplicación de agua		55



# INTRODUCCIÓN

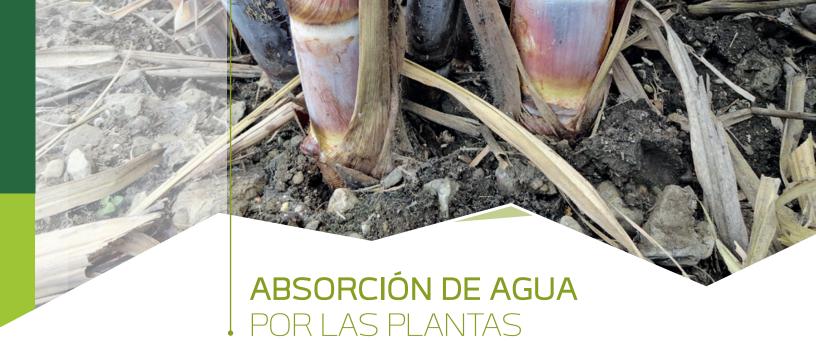
En las diferentes zonas productoras de azúcar en el mundo, el consumo total de agua de la caña varía entre 1200 y 1500 mm/año (Torres *et al.*, 2004). En las zonas subtropicales de Australia, Sudáfrica y Argentina, caracterizadas por veranos intensos, la demanda evaporativa de la atmósfera es mayor que en los trópicos, y el consumo de agua alcanza valores entre 7 y 15 mm/d.

El valle geográfico del río Cauca (Colombia) está ubicado en el trópico entre 3° y 5° N y 76° O, a 1000 msnm, con una temperatura promedio anual de 23.1 °C, precipitación anual de 1282 mm, evaporación de 1647 mm/año, radiación solar de 410 cal/cm² por día, y humedad relativa de 80% (Cenicaña, 2014). En esta zona, la demanda evaporativa es menor que en las zonas subtropicales, con valores máximos de evapotranspiración de 3.7 mm/d, medidos en lisímetros de percolación en la variedad MZC 74-275. Hoy en día, se están haciendo mediciones en lisímetros de pesaje y los valores máximos encontrados son de 7.5 mm/d en la variedad CC 93-4418, durante las horas de mayor demanda evaporativa y en períodos de rápido crecimiento de la planta.

Los factores de clima que afectan la evaporación en una superficie de agua libre son los mismos que controlan la transpiración desde la superficie de las hojas. Por lo tanto, la evaporación en el tanque clase A es un buen estimativo de la evapotranspiración actual (*ET*) de la caña, y es utilizada con éxito en Sudáfrica, Taiwán, Hawái y Colombia (Torres *et al.*, 2004).

Actualmente, a nivel mundial, se recomienda utilizar el método FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2007) como estándar para estimar la evapotranspiración de un cultivo. Este método requiere datos de radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento, además de variables aerodinámicas y localización astronómica.

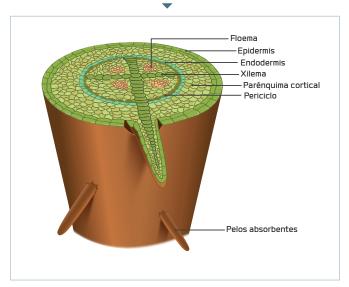
En este capítulo se presentará una sinopsis de los resultados más relevantes de la investigación sobre el requerimiento de agua en el cultivo de la caña de azúcar en el valle geográfico del río Cauca, así como los procedimientos para calcular los requerimientos de riego y la investigación sobre la función de respuesta de la caña al agua, con el fin de determinar hasta dónde es rentable regar, de acuerdo con el régimen de precipitación en cada unidad productiva.



El sistema radical sirve no solo para el anclaje de las plantas en el suelo, sino también para la absorción de agua y nutrientes. La absorción de agua se realiza en la epidermis de la raíz, específicamente, en los pelos absorbentes, por donde pasa a través de las células del parénquima cortical hasta llegar al tejido del xilema (Figura 2.1). Este tejido es el encargado de transportar la savia bruta a las hojas para usarla en el proceso de fotosíntesis. La superficie de los pelos absorbentes representa hasta el 60% del total del área de la superficie radicular.

Durante las horas de mayor demanda evaporativa de la atmósfera (11:00 a.m. - 3:00 p.m. en la zona azucarera de Colombia), el agua en el suelo que está cerca a las raíces es absorbida rápidamente y se agota. En ese momento, el flujo de agua desde el suelo hasta la raíz depende del gradiente de potencial hidráulico entre ambos y de la conductividad capilar del suelo. Las plantas, por su parte, pueden extender sus raíces a una tasa mayor de 3 mm/d para entrar en contacto con el suelo húmedo, y algunas de ellas alcanzan hasta los 60 mm/d.

Figura 2.1 Estructura típica de la raíz para explicar la absorción de agua y nutrientes.



A medida que la raíz absorbe agua, la solución del suelo se concentra cerca de las partículas donde la tensión es mayor, lo que ocasiona una reducción del agua aprovechable y la disponibilidad de los nutrientes, aunque estos últimos se encuentren en cantidades suficientes. Por otra parte, el exceso de agua en la zona radicular afecta la forma química de los nutrientes en el suelo, disminuyendo su disponibilidad.

Dentro de la planta, los movimientos ascendentes y descendentes de agua ocurren debido a gradientes de potencial hídrico, desde zonas con potencial hídrico mayor (valores menos negativos) hasta zonas con potencial hídrico menor (valores más negativos).

En las plantas, el potencial hídrico total (Pt) está representado por el efecto aditivo de los potenciales mátrico (Pm), de presión (Pp), osmótico (Po) y gravitacional (Pg). El Pm se genera por la adhesión de las moléculas de agua a otras macromoléculas. El Pp resulta por el incremento del contenido de agua en las vacuolas, que ocasionan una fuerza adicional al citoplasma y aumentan la capacidad de trabajo por parte del sistema celular de las hojas. En este, el potencial de presión es positivo y representa la presión ejercida por el protoplasto contra la pared celular, mientras que en el xilema (tejido conductor de agua) es negativo a causa de la tensión desarrollada por diferencias en el potencial hídrico originadas en la transpiración. El Po se da por la presencia de sales disueltas, lo que reduce la energía libre del agua; a medida que la concentración de estas se intensifica, el potencial osmótico se hace más negativo. Por último, el Pg se genera debido al aumento de la energía libre de las moléculas de agua por efecto de la gravedad.

El movimiento de agua en el sistema continuo suelo-planta-atmósfera es ocasionado por gradientes de potencial hídrico, y su penetración en las plantas ocurre a través de las zonas de menor resistencia de las raíces, cuando el potencial de agua en el suelo es mayor que en ellas. Al ingresar el agua en las células de la raíz, se produce una presión positiva y una columna en ascenso, la cual a su vez crea la presión radical suficiente para mantener el ingreso.

La mayor parte del agua que ingresa en la planta es liberada posteriormente en forma de vapor durante el proceso de transpiración; por otro lado, la evaporación del agua desde las paredes de las células provoca reducción del potencial hídrico, lo que determina el ascenso del agua por el xilema. Las fuerzas de cohesión que mantienen unidas las moléculas de agua y el gradiente de presión producen una corriente dentro de las traqueidas y los vasos del xilema, que se extiende hacia la endodermis de las raíces. En consecuencia, la salida de vapor de agua por los estomas, junto con la cohesión entre las moléculas de agua y la presión radical, provocan reducción del potencial hídrico en las raíces, lo cual hace que el agua circundante ingrese a la planta.

La transpiración es un proceso que depende de los factores que determinan el gradiente de concentración de vapor de agua entre la hoja y la atmósfera, la evaporación del agua dentro de las células y la apertura de los estomas; por tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y el viento son variables determinantes de este proceso. El contenido de agua en el suelo y la capacidad de este para conducirla a la zona de las raíces, así como la salinidad y la solución del suelo y las prácticas de cultivo, entre otros, también influyen en la tasa de transpiración.

Por otra parte, junto con el agua, se movilizan los nutrimentos, los cuales deben estar disueltos en el agua presente en los poros que se forman entre las partículas de suelo. La presencia y la solubilidad de los elementos minerales necesarios para el desarrollo de las plantas son condiciones esenciales para que estas llenen sus requerimientos nutritivos; cuando un elemento mineral soluble está presente en altas cantidades, es posible que ocasione problemas de toxicidad.

La solución del suelo está constituida por agua, que actúa como solvente, y nutrientes, que son los solutos. Cuando estos últimos entran a la planta a través de la raíz, son traslocados hacia las hojas, principal centro de actividad fotosintética. Esto ocurre por el proceso de difusión, que consiste en el movimiento de moléculas desde regiones de mayor energía libre hacia regiones de menor energía libre.



LOS NUTRI-MENTOS RE-QUERIDOS POR LAS PLANTAS SE MOVILIZAN DISUELTOS EN EL AGUA. El nitrógeno (N) es el nutriente más limitante en la producción de cultivos no leguminosos, como la caña de azúcar. Las plantas lo absorben como amonio ( $\mathrm{NH_4^+}$ ) o nitrato ( $\mathrm{NO_3^-}$ ). No obstante, aunque ellas requieren una combinación de ambas formas de N, por lo general, absor-

ben una mayor proporción de nitrato que de amonio. La forma predominante de N en el suelo depende principalmente del contenido de humedad, así que en suelos con exceso de humedad, se restringe la nitrificación, puesto que es un proceso realizado solo por bacterias aeróbicas.

# **REQUERIMIENTO DE** AGUA DE UN CULTIVO

El requerimiento de agua se define como la cantidad de este recurso que necesitan los cultivos para formar biomasa y satisfacer la tasa de evapotranspiración, de tal modo que puedan crecer y efectuar sus procesos fisiológicos vitales.

La evapotranspiración (*ET*) es la combinación de dos procesos mediante los cuales el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por transpiración de los cultivos (Allen *et al.*, 2006). La *ET* también se conoce como uso consuntivo o consumo de agua de un cultivo.

#### **EVAPORACIÓN**

La evaporación de agua del suelo es el proceso por el que esta pasa del estado líquido al gaseoso (vapor de agua), siendo removida del suelo debido al efecto de la energía proveniente de la radiación solar. A medida que ocurre la evaporación del agua desde la superficie del suelo, el aire circundante se carga gradualmente de humedad y la superficie del suelo pierde humedad; en consecuencia, si el aire húmedo no se transfiere a la atmósfera o si no existe un déficit de presión de vapor de agua en la superficie del suelo, el proceso de evaporación se hace cada vez más lento hasta detenerse por completo.

El déficit de presión de vapor o de saturación es un indicador de la capacidad evaporativa del aire, y se define como la diferencia entre la presión de saturación y la presión real de vapor. Entre los factores que determinan este proceso, se encuentran: radiación incidente, temperatura del aire, humedad atmosférica, velocidad del viento, grado de cobertura del suelo por el cultivo y contenido de humedad en la superficie del suelo.

En el proceso de evaporación, la humedad superficial se reduce de manera paulatina hasta una determinada profundidad en el suelo, la cual depende de la intensidad de la evaporación y de las características de transmisión de agua. Además, debido a la misma evaporación, se forma una delgada capa superficial de suelo seco que restringe o impide la evaporación del agua presente por debajo de dicha capa.

Después de un evento de lluvia o riego, la tasa de evaporación puede alcanzar valores muy altos, en especial, durante los estados iniciales de los cultivos, cuando la cobertura del suelo es baja. En estas condiciones, el uso de cultivos de cobertura o residuos de cosecha es una práctica que permite reducir significativamente la evaporación del agua del suelo.



LA EVAPORACIÓN EN LA
SUPERFICIE
DEL SUELO
FORMA UNA
CAPA DELGADA DE SUELO
SECO QUE
IMPIDE LA EVAPORACIÓN DEL
AGUA PRESENTE POR DEBAJO DE DICHA
CAPA.

### **TRANSPIRACIÓN**

EL CONO-

**CIMIENTO** 

SOBRE LA

TRANSPI-

RACIÓN ES

TAL PARA

**REQUERI-**

MIENTO DE

CULTIVOS.

AGUA DE LOS

**FUNDAMEN-**

**ESTIMAR EL** 

EVAPO-

La transpiración consiste en la evaporación del agua presente en los tejidos de las plantas y su posterior liberación hacia la atmósfera a través de los estomas, que se abren y se cierran dependiendo de la luminosidad y la disponibilidad de agua en los tejidos de las hojas. Cuando los estomas están abiertos, el aire que entra a la hoja evapora la película de agua que cubre las células del mesófilo, produciendo presión hidrostática negativa, la cual genera la succión necesaria para que el agua del xilema ascienda hacia las hojas. Más del 98% del agua absorbida por las plantas es liberada a la atmósfera como vapor y solamente entre el 1% y el 2% es utilizada para la formación de tejidos.

La absorción de CO<sub>2</sub> desde la atmósfera ocurre por difusión a través de la pared celular en el interior de la hoja, y para ello se requiere que este gas entre en solución. El tejido interno de la hoja o empalizada está constituido por las células esponjosas del mesófilo, en donde el agua se evapora generando un ambiente saturado que se comunica con la atmósfera exterior cuando están abiertos los estomas; de ahí que, para que ocurra la fotosíntesis, la absorción de CO<sub>2</sub> necesariamente va acompañada por pérdida de agua en forma de vapor.

Los estomas son activados por diferentes mecanismos como la concentración



Transpiración de una hoja.

de potasio, que los abre en las primeras horas del día, y la concentración de sacarosa, que los mantiene abiertos mientras la planta está fotosintéticamente activa. Tal como ocurre con la evaporación, la transpiración es un proceso que depende del aporte de energía, del gradiente de presión de vapor y del potencial hídrico; por tanto, para su determinación, se debe tener en cuenta la radiación solar, temperatura del aire, humedad atmosférica, velocidad del viento y el potencial hídrico del suelo. Además, es igualmente afectada por las características del cultivo, el estado de desarrollo y las prácticas de manejo.

### EVAPOTRANSPIRACIÓN (ET)

La transpiración y la evaporación son procesos que ocurren simultáneamente y representan la cantidad de agua que requiere cada cultivo para su crecimiento, desarrollo y producción. La evaporación de agua, desde la superficie de un suelo cultivado, es producto de la fracción de la radiación solar que llega a dicha superficie. Durante las etapas iniciales de cultivo, la evaporación define el flujo de vapor de agua desde el suelo hacia la atmósfera, pero con el desarrollo y a medida que cubre la superficie del suelo, la transpiración se convierte en el proceso predominante. Como resultado, un paso fundamental para estimar el requerimiento de agua de los cultivos es el conocimiento sobre la evapotranspiración, de la cual se tienen tres tipos: evapotranspiración de referencia (ETo), evapotranspiración del cultivo en condición estándar (ETc) y evapotranspiración en condición no estándar o real (ET).

# EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (*ET*<sub>o</sub>)

Es la tasa de evapotranspiración en una superficie o cultivo de referencia, sin restricciones de agua. Este concepto se introdujo para precisar la demanda de



Instalación de lisímetros de pesaje para medir la evapotranspiración.

agua por la atmósfera, independientemente del tipo de cultivo, el estado de desarrollo y las prácticas de manejo, con el fin de tener un parámetro a partir del cual relacionar la ET de otras superficies y eliminar la necesidad de definir una ET<sub>o</sub> para cada cultivo y estado de desarrollo. Lo anterior permite, además, comparar la ET medida o estimada en diferentes condiciones, localidades y épocas del año (Allen et al., 2006). La ETo se puede determinar utilizando la evaporación medida en el tanque clase A, a partir de variables meteorológicas o mediante la combinación de estas con un cultivo de referencia, empleando fórmulas empíricas (Allen et al., 2007).

La  $ET_o$  calculada a partir de la evaporación medida en el tanque clase A proporciona un índice del efecto integrado de las variables meteorológicas de radiación, temperatura del aire y velocidad del viento sobre una superficie de agua. En ausencia de lluvia, la cantidad de agua evaporada corresponde a la diferencia en la altura de la lámina de agua en el tanque, durante un período de tiempo determinado. La evaporación del tanque está relacionada con la evapotranspiración de referencia por un coeficiente empírico derivado del mismo tanque:



#### Donde:

- ET<sub>o</sub>: evapotranspiración de referencia en milímetros por día (mm/d).
- E: evaporación del tanque clase A (mm/d).
- K<sub>p</sub>: coeficiente del tanque evaporímetro.

Teniendo en cuenta los registros diarios (durante 12 años) de algunas variables meteorológicas, medidas en la estación meteorológica automatizada de Cenicaña, así como los valores diarios de evaporación medida en el tanque clase A, Peña et al. (2006) generaron un modelo para estimar la evaporación a partir de variables meteorológicas, tales como temperatura, humedad relativa, radiación y velocidad del viento. Ello ha permitido que Cenicaña disponga, para servicio de los productores de caña, el valor de la evaporación diaria requerida para programar de forma técnica los riegos, utilizando el balance hídrico computarizado.

Con el fin de crear un método estándar para determinar la evapotranspiración de referencia, de utilidad como valor de comparación homogénea de variables de cultivos en diferentes zonas del mundo, se desarrolló la ecuación FAO Penman-Monteith (Allen et al., 2006) que incorpora variables fisiológicas y aerodinámicas. Como referente, se empleó un cultivo de pasto con una altura de 12 cm, bien regado, que proporcionara sombra a todo el suelo. Igualmente, se requirieron datos de radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento, además de variables aerodinámicas y de localización astronómica del área para la cual se deseaba estimar la  $ET_o$ .

$$ET_{o} = \frac{0.408 \; \Delta \; (R_{n} - G) \; + \; \gamma \; \; \frac{900}{T + 273} \; \; U_{2} \; (e_{s} - e_{a})}{\Delta + \gamma \; (1 + \; 0.34 \; U_{2})}$$



A PARTIR DE
VARIABLES
METEOROLÓGICAS,
LA EVAPORACIÓN HA
PERMITIDO
LA PROGRAMACIÓN
TECNICA DE
LOS RIEGOS
UTILIZANDO
EL BALANCE HÍDRICO
PRIORIZADO.

#### Donde:

- ET<sub>o</sub>: evapotranspiración de referencia (mm/d)
- R<sub>n</sub>: radiación solar neta en la superficie del cultivo (MJ/m² por d)
- G: flujo de calor del suelo (MJ/m² por d)
- T: temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)
- $U_2$ : velocidad del viento a 2 m de altura (m/s)
- e<sub>s</sub>: presión de vapor de saturación (kPa)
- $e_a$ : presión real de vapor (kPa)
- $e_s$   $e_a$ : déficit de presión de vapor (kPa)
- y: constante psicrométrica (kPa/°C)

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

Este método permite comparar la evapotranspiración en diferentes regiones y períodos del año, y relacionarla con otros cultivos. La ecuación requiere datos de clima, radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento, variables que deben ser medidas a 2 metros del suelo en una superficie extensa de pasto verde, que cubra totalmente el suelo y sin limitaciones de agua, con el fin de asegurar la precisión de los cálculos. La metodología completa para el cálculo de la  $ET_o$  con esta ecuación se puede ver en la guía de Allen *et al.* (2006).



# **REQUERIMIENTO DE AGUA** DE LA CAÑA DE AZÚCAR

Los requerimientos de agua de un cultivo se refieren a la evapotranspiración (ET), definida como el proceso combinado por medio del cual el agua es convertida en vapor desde formas líquidas o sólidas vía evaporación, ya sea que estas provengan del suelo o de las superficies húmedas y tejidos internos de las plantas (Allen et al., 2007). La ET también se conoce como uso consuntivo o consumo de agua de un cultivo.

Los requerimientos de agua de la caña de azúcar varían considerablemente entre regiones o países productores del mundo, con diferencias en los ciclos de cultivo. Por lo general, el consumo de agua de este cultivo por año varía entre 1200 mm y 1500 mm, y registra los mayores valores en las zonas subtropicales, donde el verano es intenso. Por consiguiente, la demanda evaporativa de la atmósfera es mayor que en los trópicos.

También se denomina evapotranspiración (*ET*) o uso consuntivo al proceso combinado del agua perdida por evaporación directa desde la superficie del suelo y la absorbida por las raíces. Esta última, posteriormente, se pierde casi en su totalidad por transpiración a través de la superficie de las hojas. La *ET* es afectada por factores de suelo, planta y clima. Cuando el contenido de humedad en el suelo es alto, las plantas pueden transpirar a su máxima capacidad, y, en este momento, la evapotranspiración obtenida se conoce como potencial (*ETp*).

En condiciones de campo, la humedad en el suelo es variable y puede bajar hasta niveles intermedios entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. En este último estado, la planta transpira a una tasa inferior a la potencial, conocida como evapotranspiración actual (ET), valor utilizado para estimar los requerimientos de agua de las plantas.

En los suelos de textura fina y en condiciones húmedas, la evaporación desde la superficie del suelo puede ser alta antes del cierre del cultivo. Posteriormente, cuando la cobertura vegetal es del 100%, la evaporación desde el suelo es mínima y el cultivo pierde agua básicamente por transpiración.

En la estación experimental de Cenicaña, Torres et al. (2004), trabajando con plantilla y dos socas de la variedades CP 57-603 y MZC 74-275, en lisímetros de percolación, encontraron valores medios de ET de 2.1 mm/d en el período de macollamiento (2 a 4 meses), y de 3.1 mm/d en el período de rápido crecimiento (4 a 10 meses). Los requerimientos de agua de la caña de azúcar, por ciclo de cultivo de 13 meses, variaron entre 1050 mm y 1300 mm.

Esto significa que en el valle geográfico del río Cauca, tomando como base una producción de caña de 120 t/ha y un requerimiento hídrico de 1200 mm/año, se necesitarían 100 m³ de agua para producir 1 tonelada de caña. Además, si el rendimiento estimado en azúcar es de 11.5%, para producir 1 kg de azúcar se requiere 0.87 m³ de agua correspondiente solo al cultivo. Como término de comparación, se estima que para producir 1 kg de trigo se necesita 1 m³ de agua, y para 1 kg de arroz, 1.2 m³ de agua.

Estos autores encontraron en el valle geográfico del río Cauca una relación lineal significativa entre la evapotranspiración (ET) y la evaporación (E), lo que permite calcular la ET a partir de la evaporación medida en tanque clase A. Una vez estimado el valor de ET, es posible programar los riegos utilizando el método de balance hídrico.

El período vegetativo de la caña se divide en tres etapas: la de germinación y macollamiento (0 a 4 meses), la de rápido crecimiento (4 a 10 meses) y la de madu-

ración (10 a 13 meses). Esta división se adapta bien a variedades tempranas.

En los primeros estados del cultivo, las plantas son pequeñas y los requerimientos de agua son bajos. Es así como las socas, durante el rebrote y el macollamiento, presentan bajos consumos de agua y los riegos pueden ser mínimos, sin afectar la producción de caña y azúcar. Sin embargo, si el período previo a la cosecha fue seco o si por las labores de cosecha y encalle de los residuos, las cepas fueron lastimadas o el madurador las afectó, o se hizo resiembra, se recomienda aplicar riego un mes después del corte. En temporadas secas prolongadas, cuando el agua disponible es escasa, la aplicación de riego en socas se puede iniciar a los 2.5 meses de edad del cultivo.

Al comienzo del período de rápido crecimiento (4 a 7 meses), las plantas son muy susceptibles a los déficits de humedad. Cuando el suministro de agua es deficiente en esta etapa, la producción final de caña por hectárea puede ser reducida entre 20 y 40 toneladas (Cruz et al., 2009b).

En el período de maduración, la tasa de crecimiento de la caña se reduce y la planta concentra sacarosa en los tallos; por consiguiente, se recomienda reducir los riegos y evitar las aplicaciones tardías de nitrógeno para no estimular el crecimiento de los tallos y evitar así la cosecha de cañas con bajos contenidos de sacarosa. Después de 10 meses de edad, se recomienda suspender los riegos para variedades cosechadas entre 12 y 13 meses, mientras que los lotes que se cosechan a edades mayores de 13 meses se pueden regar hasta los 11 meses de edad.

Los trabajos de investigación sobre requerimientos de agua realizados por Cenicaña en zonas con nivel freático profundo (> 1.2 m) y en condiciones climáticas normales con las variedades CC 85-92, CC 93-3895 y CC 93-4418, han permitido obtener los valores *K* para convertir la



CUANDO EL SUMINISTRO DE AGUA ES DEFICIENTE EN EL PERIODO DE 4 A 7 MESES DE EDAD DEL CULTIVO, LA PRODUCCIÓN DE CAÑA PUEDE REDUCIRSE ENTRE 20 Y 40 t/ha.

evaporación del tanque clase A en evapotranspiración:

$$ET = K * E$$

#### Como sigue:

Valor K	Edad (meses)					
0.3	1-3					
0.4	3-4					
0.6	4-5					
0.7	5-6					
0.8	6-8					
0.7	8-9					
0.6	9-11					



EN PROMEDIO, UNA
PERSONA
CONSUME
190 I/d DE
AGUA, CANTIDAD EQUIVALENTE AL
CONSUMO
DE UN CULTIVO DE 400
PLANTAS DE
CAÑA.

En zonas con nivel freático entre 1.0 y 1.2 metros de profundidad, algunos de los valores de *K* se pueden reducir para aprovechar el aporte de agua capilar a partir del nivel freático, así:

Valor K	Edad (meses)					
0.5	4-6					
0.6	6-8					
0.5	8-10					
0.4	10-11					

En algunas zonas del valle geográfico del río Cauca cultivadas con caña de azúcar, es frecuente hallar niveles freáticos, que bien manejados pueden contribuir a suplir los requerimientos hídricos de la caña y, simultáneamente, reducir la necesidad o el tamaño del sistema de drenaje (Cenicaña, 1992). Un nivel freático localizado a 1.0 m de profundidad puede aportar hasta el 50% de los requerimientos de agua de la caña. En campo, es posible controlar la posición del nivel freático entre 1.0 m y 1.2 m, sin reducir la producción de caña y azúcar. Por tanto, en estas zonas, el seguimiento de la profundidad del nivel freático mediante pozos de observación es una buena alternativa para programar los riegos, específicamente en la parte sur del valle geográfico, donde la precipitación es abundante y, aun en años secos, alcanza valores entre 1100 mm y 1200 mm. Cenicaña encontró que cuando el nivel freático se mantiene a una profundidad mayor de 1.2 m durante 25 días o más, y en ese período no ocurren lluvias significativas, es el momento oportuno de regar.

El sector agrícola es considerado uno de los mayores consumidores de agua; no obstante, si se comparan las necesidades de agua de una persona y las de las plantas, se tiene que, en promedio, una persona consume 190 l/d, cantidad equivalente a la que consume un cultivo de caña que ocupa una superficie de 65 m², donde caben unas 400 plantas, las cuales producen anualmente 100 kg de azúcar, en promedio.

# **REQUERIMIENTO DE RIEGO EN EL**CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR

En su forma más simple, el requerimiento de riego neto (*RRn*) de un cultivo se define como la diferencia entre la evapotranspiración y la precipitación efectiva durante un período determinado, que para la región, puede ser de un mes.

$$RRn = ET - Pe$$

#### Donde:

- ET: evapotranspiración actual expresada en milímetros por mes (mm/mes)
- Pe: precipitación efectiva (mm/mes)

En sitios donde se puedan presentar aportes de agua desde el nivel freático (*NF*, en mm/mes), o si se considera

que ocurre un cambio en la cantidad de agua almacenada en el suelo (*CHS*, en mm/mes), el requerimiento de riego neto se calcula con la siguiente ecuación:

$$RRn = ET - Pe - NF - CHS$$

En términos prácticos, en áreas donde el nivel freático permanece profundo en época seca y el cambio en la humedad del suelo (*CHS*) es bajo, el requerimiento de riego neto para una hacienda o unidad productiva se puede estimar de la manera más sencilla:

$$RRn = ET - Pe$$

Para determinar la demanda de riego en una hacienda o unidad productiva, se debe calcular el requerimiento de riego en la fuente (RRf), que incluye el requerimiento de riego neto más el agua para el lavado de sales y la reposición de las pérdidas de agua del sistema de riego. Considerando que en la zona azucarera de Colombia la precipitación es suficiente para lavar las sales del suelo, por lo general, no es necesario tener en cuenta este factor en el cálculo de los requerimientos de riego. Por lo tanto, la ecuación simplificada queda de la siguiente forma:

$$RRf = \frac{RRn}{\text{Eficiencia de riego}}$$

Eficiencia de riego: Ea \* Ec \* Eal

#### Donde:

 Ea: eficiencia de aplicación expresada en fracción decimal, por ejemplo, si la Ea es de 50%, su expresión en fracción decimal es 0.5.

- *Ec*: eficiencia de conducción (fracción decimal).
- Eal: eficiencia de almacenamiento en reservorios o embalses, si existen (fracción decimal).

De acuerdo con la información recopilada por Cenicaña, las **eficiencias de riego** en el sector azucarero de Colombia presentan estos rangos de valores:

- De aplicación en riego por surcos: 40%
   60%
- De aplicación en riego por aspersión con cañones: 60% - 80%
- De conducción: 70% 85%
- De almacenamiento en reservorios o embalses: 85% - 95%

La demanda de riego (mm/d) de una unidad productiva también se puede expresar en litros por segundo por hectárea (l/s por ha). En ese caso se denomina módulo de riego, el cual varía de acuerdo con las horas de operación diarias y el número de días hábiles de riego por semana. Si el riego opera de modo continuo durante 24 h/d y 7 días a la semana, el factor de conversión de mm/d a l/s por hectárea es igual a 0.116, y se deduce de la siguiente expresión:

$$\frac{1 \text{ mm}}{\text{d}} * \frac{1 \text{ I/m}^2}{1 \text{ mm}} * \frac{10,000 \text{ m}^2}{1 \text{ ha}} * \frac{1 \text{ d}}{86,400 \text{ s}} = \frac{0.116 \text{ I/s por hectárea}}{\text{hectárea}}$$

# **DETERMINACIÓN DE**LA PRECIPITACIÓN EFECTIVA

La precipitación efectiva (*Pe*) se define como la fracción de la precipitación total que llega hasta el suelo y que puede ser aprovechada por el cultivo (Doorenbos y Pruitt, 1992). Cuando esta precipitación participa en el cálculo de los requerimientos de riego de un cultivo, se utilizan datos de precipitación mensual de 10 años o más y se expresa en mm/mes, con una probabilidad de ocurrencia de 75%.

# PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR LA PRECIPITACIÓN EFECTIVA

Para la determinación de esta precipitación, se siguen los pasos que se detallan a continuación:

- 1. Elaborar un cuadro en Excel® con los datos de precipitación mensual multianual (10 años o más), registrados en un pluviómetro representativo del predio. Así mismo, calcular la precipitación total para cada año, como se muestra en el Cuadro 2.1, donde se presentan los datos de precipitación media mensual multianual de las 34 estaciones que conforman la Red Meteorológica Automatizada del sector agroindustrial de la caña de azúcar en el valle geográfico del río Cauca.
- 2. Ordenar de mayor a menor los datos de precipitación anual (Cuadro 2.2).
- Asignar un número de orden a cada valor de precipitación anual (Cuadro 2.2, columna 3).
- **4.** Calcular la frecuencia relativa (*F*) de cada valor de precipitación anual ya ordenado, mediante la siguiente ecuación:

$$F = \frac{m}{n+1} * 100$$

#### Donde:

- m: número de orden asignado a cada valor de precipitación.
- n: número total de eventos, en este caso
   n = 20.

En la columna 4 del Cuadro 2.2, aparece el cálculo de la frecuencia relativa de la precipitación anual.

- **5.** Construir el gráfico de dispersión con la precipitación anual en el eje *Y vs.* los valores de frecuencia en el eje *X* (Figura 2.2).
- 6. Trazar la tendencia lineal y obtener la ecuación de la línea de mejor ajuste. En este ejemplo es:

$$Y = 1636.2 - 8.1731X$$

Teniendo en cuenta que Y es la precipitación anual (P) y X la frecuencia (F), la ecuación se puede escribir como:

$$P = 1636.2 - 8.1731F$$

7. Una vez obtenida la ecuación de la precipitación en función de la frecuencia, se calcula la precipitación anual que corresponde a la frecuencia de 75%. En este ejemplo:

$$P = 1023 \text{ mm}$$

8. Dividir el valor encontrado de precipitación anual para una frecuencia de 75% entre la precipitación media anual. En este caso es:

$$\frac{1023}{1228} = 0.83$$

El cociente resultante se multiplica por la precipitación media mensual para obtener la precipitación de cada mes con probabilidad de 75% (Cuadro 2.3).

9. Finalmente, este último valor se multiplica por 0.9 para los meses secos y por 0.8 para los meses lluviosos (Alarcón y Cruz, 2012), con el fin de obtener la precipitación efectiva mensual con 75% de probabilidad (Cuadro 2.4).

Cuadro 2.1 Precipitación media mensual multianual a partir de la Red Meteorológica Automatizada. Valle geográfico del río Cauca 1994-2013.

•													
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
1994	103	100	164	235	168	38	34	31	63	155	202	71	1364
1995	27	19	104	138	131	102	84	59	72	167	112	93	1107
1996	92	112	201	176	161	132	61	61	92	136	81	85	1389
1997	179	63	131	176	86	118	7	4	93	101	180	33	1171
1998	15	64	124	185	169	65	66	61	137	84	132	67	1169
1999	100	201	106	184	102	106	32	55	127	132	134	101	1382
2000	104	140	131	132	159	86	54	52	98	87	122	70	1235
2001	74	57	129	57	110	54	38	9	91	52	100	103	874
2002	41	27	113	106	58	54	56	36	70	116	90	100	867
2003	29	58	85	158	69	105	39	54	79	132	143	63	1015
2004	76	28	35	132	122	27	57	24	79	148	148	59	936
2005	73	53	103	94	140	50	38	42	65	134	128	109	1027
2006	99	55	171	178	114	113	37	25	37	110	144	147	1231
2007	64	31	141	226	166	60	75	107	55	212	117	144	1400
2008	101	141	146	209	217	120	101	124	72	111	162	118	1622
2009	118	83	190	92	107	102	36	50	39	106	93	98	1116
2010	17	51	57	217	171	121	163	78	119	159	297	193	1644
2011	61	155	139	275	104	72	100	52	67	230	189	192	1635
2012	179	87	129	213	95	54	30	51	32	164	94	74	1202
2013	26	113	122	137	192	37	27	73	91	124	112	112	1166
Pro- medio	79	82	126	166	132	81	57	52	79	133	139	102	1228

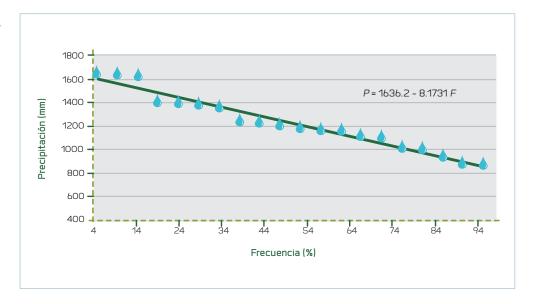
Cuadro 2.2

Precipitación anual en orden descendente y frecuencia relativa para calcular el factor con el cual se determina la precipitación mensual con una frecuencia de 75%. Valle geográfico del río Cauca.

Año	Precicipatación anual en orden descendente (mm)	No. de orden (m)	Frecuencia relativa (%)
2010	1644	1	4.76
2011	1635	2	9.52
2008	1622	3	14.29
2007	1400	4	19.05
1996	1389	5	23.81
1999	1382	6	28.57
1994	1364	7	33.33
2000	1235	8	38.10
2006	1231	9	42.86
2012	1202	10	47.62
1997	1171	11	52.38
1998	1169	12	57.14
2013	1166	13	61.90
2009	1116	14	66.67
1995	1107	15	71.43
2005	1027	16	76.19
2003	1015	17	80.95
2004	936	18	85.71
2001	874	19	90.48
2002	867	20	95.24

Figura 2.2

Línea de mejor ajuste con los valores de precipitación anual (eje Y) vs. frecuencia (eje X). La precipitación anual que corresponde a la frecuencia de 75% es 1023 mm.



#### Cuadro 2.3

Promedio de precipitación mensual y precipitación con probabilidad de 75%. Valle geográfico del río Cauca.

Precipitación	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Promedio	79	82	126	166	132	81	57	52	79	133	139	102
Factor	0.83											
Precipitación con frecuencia de 75%	66	68	105	138	110	67	47	44	66	110	115	84

#### Cuadro 2.4

Precipitación con frecuencia de 75% y precipitación efectiva mensual con probabilidad de 75%. Valle geográfico del río Cauca.

Precipitación	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Precipitación con frecuencia de 75%	66	68	105	138	110	67	47	44	66	110	115	84
Factor para en- contrar la precipi- tación efectiva	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9
Precipitación efec- tiva con frecuen- cia de 75%	59	61	84	110	88	60	42	39	59	88	92	76

# CÁLCULO DEL REQUERIMIENTO DE RIEGO

El requerimiento de riego se calcula una vez se ha obtenido el valor de la precipitación efectiva mensual con una probabilidad de 75%. Para ello, se puede utilizar uno de los siguientes métodos: 1) basado en la eficiencia de riego, que se conoce como requerimiento de riego a largo plazo; y 2) basado en el volumen de agua aplicado por evento de riego (m³/ha) y la lámina de agua rápidamente aprovechable (*LARA*) en milímetros (mm). Este último se considera práctico para aplicar en unidades productivas que utilizan riego por gravedad y se denomina requerimiento de riego operativo.

### PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR EL REQUERIMIENTO DE RIEGO OPERATIVO

Teniendo en cuenta que en el cultivo de la caña de azúcar en el valle geográfico del río Cauca, Colombia, el riego por surcos es el sistema utilizado en el 79% del área sembrada,

a continuación se presenta el procedimiento para calcular el requerimiento de riego operativo por el método basado en el volumen de agua aplicado por evento de riego y la *LARA*:

- Se elabora un archivo en Excel con la información de precipitación efectiva mensual con una frecuencia de 75% y la evaporación media mensual multianual calculada a partir del dato medido en el tanque clase A (Cuadro 2.5).
- 2. Se calcula la evapotranspiración mensual del cultivo de la caña de azúcar, multiplicando el valor de la evaporación media mensual multianual por el factor K, definido como la relación entre la evapotranspiración actual (ET) y la evaporación medida en el tanque clase A (E), cuyo valor encontrado por Cenicaña en caña de azúcar de más de 4 meses de edad es 0.7 (Cuadro 2.6).
- **3.** Se calcula el requerimiento de riego neto (*RRn*) mensual restando de la evapotranspiración (*ET*) la precipitación efectiva total (*Pe*), como aparece en el Cuadro 2.6.
- 4. Se determina el *RRn* acumulado para cada uno de los períodos relativamente secos que ocurren entre junio 15 y septiembre 15, y entre diciembre 15 y marzo 15 (Cuadro 2.6). Este cálculo se realiza sumando los valores positivos de *RRn* en junio, julio, agosto y septiembre:

$$27 + 56 + 62 + 15 = 160 \text{ mm}$$

Mientras que para el otro período se suman los valores positivos de diciembre, enero, febrero y marzo:

$$10 + 29 + 30 = 69 \text{ mm}$$

5. Finalmente, se calcula el requerimiento de riego operativo (RRop) expresado como caudal equivalente o módulo de riego operativo (I/s por ha), utilizando la siguiente ecuación:

$$RRop = \frac{V \text{ (m}^3/\text{ha)}}{I \text{ (d)} * 12 \text{ h/d} * 3.6}$$

#### Donde:

- V: volumen de agua aplicado por cada evento de riego (m³/ha).
- I: intervalo requerido entre riegos (días), calculado como el número de días que dura la temporada más seca (90 días en la zona azucarera de Colombia) dividido entre el número de riegos requeridos en la misma temporada. El número de riegos se determina dividiendo el requerimiento de riego total (mm) de la temporada más seca entre el valor de la LARA (mm).
- 12: tiempo en horas de riego por día.
- El valor de 3.6 en el denominador se utiliza para convertir unidades, así:

$$RRop = \frac{V (m^{3}/ha) * \frac{1000 \text{ l}}{m^{3}}}{I (d) * \frac{12 \text{ h}}{d} * \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}}}$$

#### **EJEMPLO**

#### Cálculo del requerimiento de riego operativo

Utilizando datos reales, se quiere calcular el *RRop* en un lote sembrado con caña de azúcar en el valle geográfico del río Cauca, con un valor *LARA* del suelo de 60 mm y un volumen de agua aplicado por cada evento de riego por gravedad de 1500 m³/ha, medido desde la propia fuente de agua.

• RRn total para el período más seco:

160 mm

• Número de riegos durante la época más seca:

160 mm/60 mm = 2.66 riegos

• Duración de la temporada seca (del 15 de junio al 15 septiembre):

• Intervalo de riego requerido:

$$I = 90/No. riegos = 34 días$$

• Requerimiento de riego operativo o módulo de riego operativo:

$$RRop = \frac{1500}{(34 * 12 * 3.6)} = 1.03 \text{ l/s por ha}$$

• Número de riegos en 1 año:

$$\frac{(160 \text{ mm} + 69 \text{ mm})}{60 \text{ mm}} = 3.8 \text{ riegos}$$

#### Cuadro 2.5

Precipitación efectiva y evaporación media mensual multianual calculada a partir del dato medido en el tanque clase A.

•													
Precipitación y evaporación	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	
Precipitación efectiva ( <i>Pe</i> ) con frecuencia 75%	59	61	84	110	88	60	42	39	59	88	92	76	
Evaporación ( <i>E</i> )	125	130	110	98	95	125	140	145	105	95	101	123	

#### Cuadro 2.6

Evapotranspiración mensual de la caña de azúcar y requerimiento de riego neto. Valle geográfico del río Cauca.

•												
Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Precipitación efectiva (Pe) con frecuencia 75%	59	61	84	110	88	60	42	39	59	88	92	76
Evaporación ( <i>E</i> ) (mm)	125	130	110	98	95	125	140	145	105	95	101	123
Evapotranspiración ( <i>ET</i> ) (mm)	88	91	77	69	67	88	98	102	74	67	71	86
Requerimiento de riego neto (RRn)	29	30	-7	-42	-21	27	56	62	15	-22	-22	10
RRn período más seco jun. 15 - sep. 15 (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	160	-	-	-
RRn para el otro período seco dic. 15 - mar. 15 (mm)	-	69	-	-	-	-	-	-	-	_	_	-

### PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR EL REQUERIMIENTO DE RIEGO A LARGO PLAZO

Otro método para calcular el requerimiento de riego en un predio se basa en la eficiencia, y se considera adecuado para unidades productivas o explotaciones donde se utilizan sistemas diferentes al riego por gravedad, o donde se tiene una combinación de sistemas de riego, por ejemplo, gravedad y aspersión, gravedad y goteo, aspersión y goteo.

Este cálculo es similar al procedimiento para calcular el requerimiento de riego operativo hasta el paso 4 en el que se determina el requerimiento de riego neto (*RRn*) acumulado para cada uno de los dos períodos secos que ocurren entre junio 15 y septiembre 15, y entre diciembre 15 y marzo 15 (ver Cuadro 2.6). El paso siguiente consiste en determinar

el requerimiento de riego en la fuente (RRf), utilizando la siguiente ecuación:

$$RRf = \frac{RRn}{\text{Eficiencia de riego}}$$

Eficiencia de riego = Ea \* Ec \* Eal

#### Donde:

- Ea: eficiencia de aplicación (fracción decimal).
- Ec: eficiencia de conducción (fracción decimal).
- Eal: eficiencia de almacenamiento en reservorios o embalses, si existen (fracción decimal).

### **EJEMPLO**

#### Cálculo del requerimiento de riego a largo plazo

A partir del requerimiento de riego neto total durante el período más seco (160 mm), que ocurre entre junio 15 y septiembre 15 (ver Cuadro 2.6), se debe calcular el requerimiento de riego en la fuente en una explotación de caña de azúcar con las siguientes características:

- Requerimiento neto, período más seco (mm): 160
  - Eficiencia de aplicación (%): 50
  - Eficiencia de conducción (%): 80
- Requerimiento en la fuente, período más seco (mm):

$$160/(0.5 * 0.8) = 400 \text{ mm}$$

• Requerimiento diario en la fuente (mm/d):

$$400 \text{ mm}/90 \text{ días} = 4.4 \text{ mm/d}$$

Módulo de riego para una operación de 12 h/d (l/s por ha):

$$4.4 \frac{\text{mm}}{\text{d}} * \frac{1 \text{ l/m}^2}{1 \text{ mm}} * \frac{10,000 \text{ m}^2}{1 \text{ ha}} * \frac{1 \text{ d}}{12 \text{ h}} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 1.03 \text{ l/s por ha}$$

Módulo de riego para una operación continua de 24 h/d (l/s por ha):

$$4.4 \frac{\text{mm}}{\text{d}} * \frac{1 \text{ l/m}^2}{1 \text{ amm}} * \frac{1 \text{ d}}{86,400 \text{ s}} * \frac{10,000 \text{ m}^2}{\text{ha}} = 0.51 \text{ l/s por ha}$$

En relación con el requerimiento de riego en el cultivo de la caña de azúcar es importante tener en cuenta que en el valle geográfico del río Cauca, el riego es de régimen suplementario, puesto que la precipitación pluvial provee más del 70% del requerimiento hídrico total del cultivo (entre 1050 mm y 1200 mm), medido en lisímetros de percolación en la estación experimental de Cenicaña. Por tanto, el requerimiento de riego neto varía entre 100 mm y 400 mm por ciclo de cultivo, el cual es suministrado mediante la aplicación de uno a siete riegos por surco. En algunos casos no se requiere de riego en las zonas de alta precipitación anual o cuando se presentan períodos lluviosos prolongados como producto del fenómeno de La Niña.

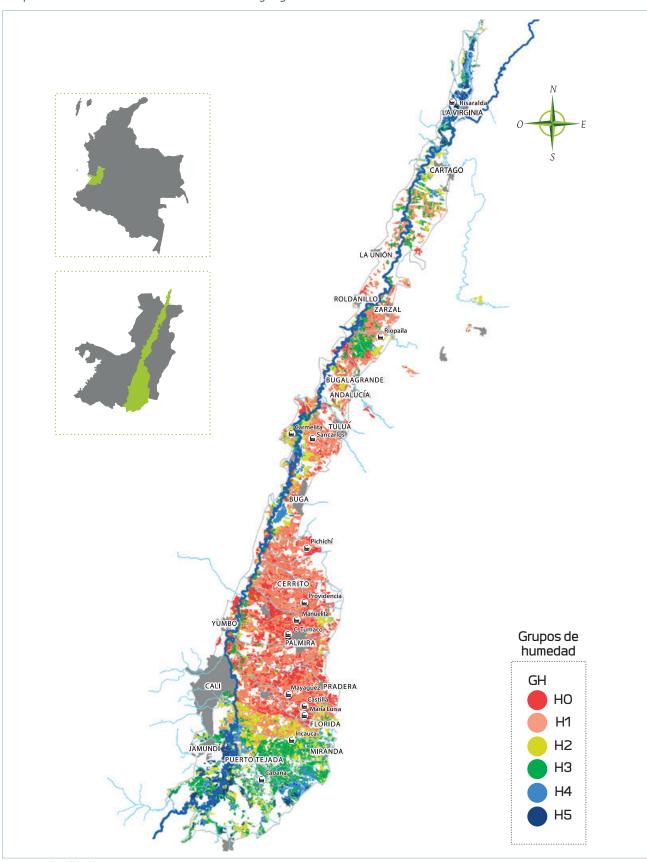
En el valle geográfico del río Cauca se han identificado seis grupos de humedad de acuerdo con el balance hidrológico entre la evapotranspiración de la caña y la precipitación y la permeabilidad del suelo (Torres et al., 2009). Las zonas de menor precipitación corresponden a los grupos de humedad H0 y H1 (Figura 2.3), que ocupan un área de 119,025 hectáreas, y presentan los mayores requerimientos de riego (entre cuatro y siete por ciclo de cultivo). Las zonas de precipitación intermedia pertenecen a los grupos de humedad H2 y H3 con un área de 64,301 hectáreas y una necesidad de riego media (entre dos y seis riegos). Finalmente, se encuentran las zonas de mayor precipitación que corresponden a los grupos de humedad H4 y H5 con un área de 20,453 hectáreas y un requerimiento de riego mínimo (uno o tres riegos).

En la región azucarera de Colombia se requiere infraestructura de drenaje para obtener producciones rentables, pero es en las zonas de precipitación alta a moderada (grupos de humedad H3, H4 y H5) donde más se debe invertir en drenaje tanto superficial como subterráneo.

Durante la última década se han presentado temporadas de baja precipitación en meses que tradicionalmente son lluviosos, condición que exige la programación de los riegos por balance hídrico, el control administrativo del riego y la inversión en tecnologías de alta eficiencia como riego por pulsos, riego localizado de bajo costo (combinación de goteo y caudal reducido), riego por aspersión con pivote o cañón viajero, con el fin de contrarrestar los efectos negativos de la falta de agua en la producción y rentabilidad del cultivo.

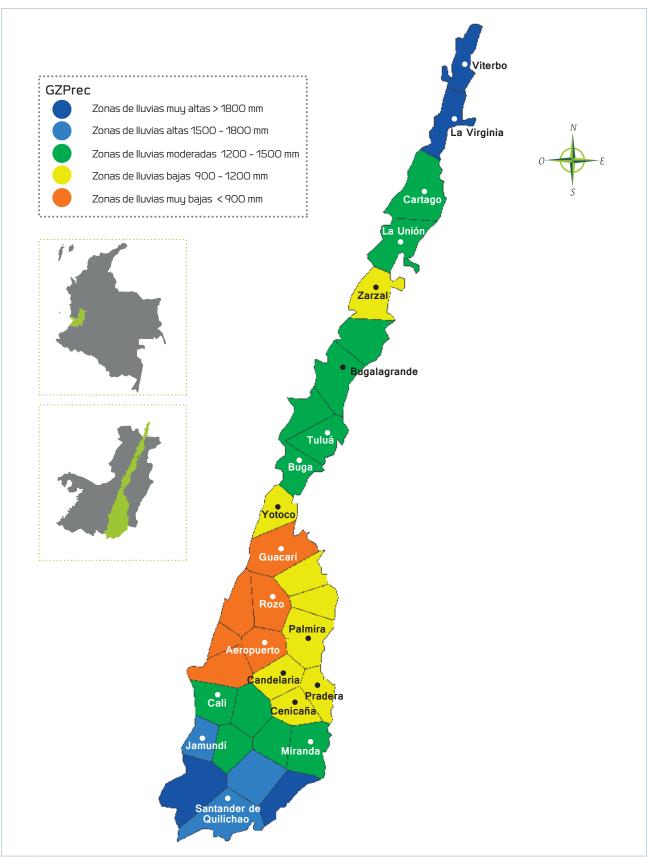
Los requerimientos de riego de la caña de azúcar varían de acuerdo con la etapa de crecimiento, distribución y cantidad de lluvia, que en el valle geográfico del río Cauca oscila entre 700 y 2000 mm/año. Las zonas de menor precipitación están localizadas entre Candelaria y Buga, y entre los municipios de La Victoria y Cartago, mientras que las zonas de mayor precipitación están ubicadas al sur entre Jamundí y Santander de Quilichao, y al norte entre los municipios de La Virginia y Viterbo (Figura 2.4).

Figura 2.3 ▼
Grupos de humedad identificados en el valle geográfico del río Cauca.



Fuente: Carbonell et al., 2011.

Figura 2.4 ▼
Grandes zonas de precipitación identificadas por Cenicaña.

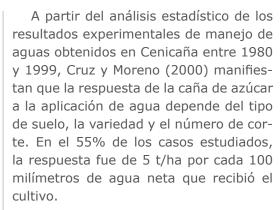


Fuente: Área de meteorología de Cenicaña.

# **RESPUESTA DE LA CAÑA DE** AZÚCAR A LA APLICACIÓN DE AGUA

Para un uso eficiente y sostenible del recurso hídrico, uno de los factores clave es conocer la función de respuesta de la caña de azúcar a la aplicación de agua, que se define como la relación entre la producción y la cantidad de agua neta recibida por el cultivo (Doorenbos y Kassam, 1986), y que indica a los productores el efecto del estrés por sequía y la respuesta que pueden esperar con la aplicación de uno o varios riegos, de acuerdo con la variedad y la zona agroecológica.

En 1983, Cenicaña encontró que los requerimientos totales de agua de la caña de azúcar para un período de 13 meses varían entre 1050 mm y 1300 mm, lo cual indica que, para producciones de caña entre 120 t/ha y 130 t/ha, la eficiencia de uso de agua es de 10 a 11 toneladas de caña por cada 100 mm de agua neta suministrada al cultivo, incluyendo riego más precipitación. De acuerdo con el estudio de Yang y Torres (1984), en áreas con nivel freático profundo en las que el período de máximo crecimiento ocurre durante la época de baja precipitación, la respuesta máxima en producción fue de 30 t/100 mm de agua. En zonas con nivel freático profundo, cuando la época seca coincidió con el comienzo o el final del período de rápido crecimiento de la planta, la eficiencia fue de 10 t/100 mm de agua, mientras que en áreas de nivel freático alto, donde parte del período de rápido crecimiento de la planta ocurrió en época seca, se obtuvo una eficiencia aproximada de 7 t/100 mm de agua. En áreas con nivel freático alto y cuando el cultivo no experimentó déficit de humedad en el período de rápido crecimiento, esta eficiencia fue de 3 t/100 mm de agua.



Según Doorenbos y Kassam (1986), para determinar la respuesta de un cultivo a la aplicación de agua es necesario cuantificar experimentalmente el efecto del estrés por falta de agua en la producción. En caña de azúcar, la relación entre la reducción de la producción relativa y el déficit de evapotranspiración relativo se puede expresar a través del factor de respuesta de la producción (*Ky*) de la siquiente forma:

$$\left(1 - \frac{TCHa}{TCHm}\right) = Ky\left(1 - \frac{ET}{ETp}\right)$$

Donde:

- TCHa: producción actual de caña (t/ha) de cada uno de los tratamientos de riego.
- TCHm: producción máxima obtenida en el experimento (t/ha).
- Ky: factor de respuesta a la aplicación de agua, en producción de caña.
- ET: evapotranspiración actual o real estimada como la lámina neta de agua recibida por el cultivo (precipitación efectiva + lámina de riego neta) en cada uno de los tratamientos de déficit de riego.



PARA PRO-**DUCCIONES** DE CAÑA ENTRE 120 t/ ha Y 130 t/ ha, LA EFI-CIENCIA DE USO DE AGUA ES DE 10 A 11 **TONELADAS** DE CAÑA POR CADA 100 mm **DE AGUA NETA SUMI-**NISTRADA AL CULTIVO.

ETp: evapotranspiración máxima o potencial, calculada como la lámina neta de agua recibida por el cultivo (precipitación efectiva + lámina de riego neta) en el tratamiento sin déficit de agua.

En la condición de cero déficit de agua, la evapotranspiración del cultivo ocurre a la tasa máxima o potencial (*ETp*), y la producción obtenida equivale a la producción máxima o potencial del cultivo (*TCHm*). Sin embargo, cuando se presenta un déficit de humedad en el suelo, la evapotranspiración real es menor que la potencial.

En un experimento realizado en el Ingenio Manuelita, zona agroecológica 11H0, suelo Mollisol, Fluventic Haplustolls, familia francosa fina, Cruz (2012) encontró la función de respuesta en producción a la aplicación de agua de la variedad CC 85-92 en tercer, cuarto y quinto cortes, así:

$$\left(1 - \frac{TCHMa}{TCHMm}\right) = 0.4492 \left(1 - \frac{ET}{ETp}\right)$$

#### Donde:

- TCHMa: producción real de caña (t/ha) por mes.
- TCHMm: producción máxima de caña obtenida, expresada en t/ha por mes.

De acuerdo con la función de respuesta encontrada, en suelos de textura franca-fina, por cada riego aplicado se puede esperar una respuesta de 4 t/ha, y el número de riegos en un año normal a seco podría ser de cinco a siete.

Además, fue posible conocer que cuando en la zona agroecológica 11H0 se presenta una demora de 2 semanas en la aplicación del riego programado mediante balance hídrico en caña de 2 a 4 meses, la reducción en producción puede llegar a 1 t/ha, pero si el retraso es en cañas de 4 a 8 meses, la reducción

es de 4 t/ha, y de 2 t/ha en cañas de 8 a 10 meses.

Por otra parte, en el Ingenio Providencia, zonas agroecológicas 22H0 y 18H0, suelos Entic Haplustolls y Fluventic Haplustolls, familia textural franca-gruesa, Cruz (2012) encontró la función de respuesta de la producción de caña a la aplicación de agua para la variedad CC 85-92 (primera y segunda socas):

$$\left(1 - \frac{TCHMa}{TCHMm}\right) = 0.8225 \left(1 - \frac{ETa}{ETp}\right)$$

Según esta función, en suelos de textura franca-gruesa, nivel freático profundo, por cada riego se puede esperar una respuesta de 7 t/ha, y el número de riegos en un año normal podría ser de siete, mientras que un año seco el número de riegos podría ser de nueve.

En las zonas agroecológicas 22H0 y 18H0, cuando se presenta un retraso de 2 semanas en la aplicación de riego programado mediante balance hídrico, la reducción en producción de caña puede llegar a 3 t/ha, si el retraso es en cañas de 2 a 4 meses; a 7 t/ha si es en cañas de 4 a 8 meses, y a 4 t/ha en cañas de 8 a 10 meses. En estos trabajos se comprobó que el período de mayor requerimiento de agua ocurre entre 4 y 8 meses de edad del cultivo, seguido del período entre 8 y 10 meses, lo cual ratifica el uso de este criterio en la priorización de los riegos por balance hídrico, desarrollado por Cenicaña.

## APLICACIÓN PRÁCTICA DE LA FUNCIÓN DE RESPUESTA DE LA CAÑA AL AGUA

La aplicación práctica de la función de respuesta de la producción de caña al suministro de agua se basa en la estimación de la producción de caña (*TCHa*), en caso de que no se pueda efectuar el número de riegos requeridos para suplir

la evapotranspiración máxima (*ETp*). El valor de la *ETp* para el conjunto de los tres cortes realizados en el experimento en la zona agroecológica 11H0 fue de 1220 mm. Conforme a la función de respuesta encontrada, a ese valor de *ETp* le corresponde una producción máxima en toneladas de caña por hectárea por mes (*TCHMm*) de 10.9 y, por tanto, una producción máxima de 142 t/ha en socas, si se cosecha a los 13 meses de edad.

Considerando una precipitación efectiva de 700 mm, registrada en la zona del experimento, para una lámina de agua rápidamente aprovechable (*LARA*) de 65 mm y un período seco entre 3 y 6 meses de edad, se requerirían ocho riegos para alcanzar la *ETp* de 1220 mm (Cuadro 2.7). Si se aplica un riego menos, es decir, siete, la lámina neta total recibida sería de 1155 mm (*ETa*) y la producción de caña (*TCHa*) estimada mediante la función de respuesta sería de 138 t/ha, calculada de la siguiente forma:

$$\left(1 - \frac{TCHMa}{TCHMm}\right) = 0.4492 \left(1 - \frac{ET}{ETp}\right)$$

$$\left(1 - \frac{TCHMa}{10.9 \text{ t/ha/mes}}\right) = 0.4492 \left(1 - \frac{1155 \text{ mm}}{1220 \text{ mm}}\right)$$

$$\left(1 - \frac{TCHMa}{10.9 \text{ t/ha/mes}}\right) = 0.0239$$

TCHMa = 10.639 t/ha/mes

En consecuencia, la producción estimada (t/ha), si la caña se cosecha a los 13 meses de edad sería:

TCHa = 10.639 t/ha/mes \* 13 meses = 138 t/ha

Si se aplican dos riegos menos, es decir, que en total solo se puedan aplicar seis, la lámina neta total recibida sería de 1090 mm (*ETa*) y la producción de caña esperada (*TCHa*) sería de 135 t/ha.

El análisis de rentabilidad de riego (Cuadro 2.7) mostró que si el precio de la tonelada de caña es de \$ 70,000, el ingreso adicional obtenido por la producción extra de 27 t/ha al aplicar ocho riegos es de \$ 1,899,115/ha, mientras que el costo/ha de estos riegos es de \$ 1,200,000/ha (a \$ 150,000/ha por riego), y el margen operacional, calculado como la diferencia entre el ingreso extra y el costo de riego, es de \$ 699,115/ha. Si se aplican dos riegos menos, el ingreso adicional obtenido al producir 20 toneladas más por hectárea es de \$ 1,424,336/ ha, el costo por hectárea de los cuatro riegos es de \$ 900,000, y el margen operacional por hectárea es de \$ 524,336.

Estos resultados indican que en los suelos de familia textural franco fina con nivel freático profundo, donde la precipitación efectiva total sea deficitaria (700 mm/año), especialmente entre 3 y 6 meses de edad del cultivo, la aplicación de ocho riegos suplementarios es rentable.

De acuerdo con la función de respuesta encontrada, en suelos mencionados, en un año con precipitación normal, la aplicación de cinco a siete riegos genera el mayor margen operacional, mientras que en años secos, este margen se obtiene con la aplicación de siete u ocho riegos. Además, por cada riego se puede esperar una respuesta de 4 a 5 t/ha.

#### Cuadro 2.7

Aplicación de la función de respuesta a la aplicación de agua encontrada en la zona agroecológica 11H0, suelo Manuelita, variedad CC 85-92, soca. Valle geográfico del río Cauca.

					No. de rie	gos			
Indicador	Sin riego	1	2	3	4	5	6	7	8
Precipitación efectiva anual (mm)	700	700	700	700	700	700	700	700	700
Lámina total de riego (mm)	0	65	130	195	260	325	390	455	520
Evapotranspiración esti- mada ( <i>ETa</i> ) (mm)	700	765	830	895	960	1025	1090	1155	1220
Relación <i>ET/ETp</i>	0.57	0.63	0.68	0.73	0.79	0.84	0.89	0.95	1.00
Déficit de agua relativo (1 – <i>ET/ETp</i> )	0.34	0.37	0.32	0.27	0.21	0.16	0.11	0.05	0.00
TCHm estimado	8.8	9.1	9.3	9.6	9.9	10.1	10.4	10.6	10.9
TCHMa estimado (13 meses)	115	118	121	125	128	132	135	138	142
TCH adicional	0	3	7	10	14	17	20	24	27
Ingreso adicional/ha (\$)	0	237,389	474,779	712,168	949,557	1,186,947	1,424,336	1,661,725	1,899,115
Costo total riego (\$)	0	150,000	300,000	450,000	600,000	750,000	900,000	1,050,000	1,200,000
Margen operacional (\$/ha)	_	87,389	174,779	262,168	349,557	436,947	524,336	611,725	699,115







# CONTENIDO

Oferta de agua para riego en una unidad productiva	64
Caudal disponible por unidad de área	
Caudal de manejo por operario de riego $(Q_{mr})$	
Número de operarios de riego necesarios por predio $(N_r)$	
Área regada por día y por operario $(A_{rd})$	
Caudal real captado en un cauce superficial	
Caudal real captado en un pozo profundo	
Caudal equivalente suministrado por una fuente de agua con e	
Cauce superficial más embalse de regulación semanal	
Cauce superficial más embalse de regulación en época lluv	viosa 69
Pozo profundo más reservorio	
Demanda de agua para riego en una unidad productiva  Requerimiento de riego	73
Cálculo del balance hidrológico de oferta y demanda de ago	ua80



# INTRODUCCIÓN

El balance hidrológico para una finca o unidad productiva de caña de azúcar se define como la diferencia entre la oferta de agua en el predio y el requerimiento de riego en la fuente, que tiene en cuenta las eficiencias del sistema de riego.

El cálculo del balance de oferta y demanda de agua es útil en el mejoramiento de la gestión de riego y básico para la planeación de esta en una finca, además de ser el soporte técnico ante la autoridad ambiental para una solicitud de concesión de agua superficial o un permiso para construir un pozo profundo. Este balance permite conocer si son necesarias determinadas obras de desarrollo como, por ejemplo, embalses de regulación, pozos profundos o un sistema de uso de excedentes de agua, entre otras.

La planeación de riego para una unidad productiva consiste en identificar y recolectar información sobre los factores físicos y socioeconómicos relevantes que la afectan, seguido por la formulación y evaluación de alternativas para tomar decisiones acerca del sistema de riego que requiere (Solomon et al., 2007).

Dado que en el capítulo 2 de este libro se demostró que la demanda de agua equivale al requerimiento de riego en la fuente, en este nuevo capítulo se presentarán los conceptos y las metodologías para el cálculo de cada uno de los factores involucrados en la oferta y la demanda de agua para riego, con ejemplos que facilitan su aplicación por parte de los productores en sus empresas.



PARA RIEGO EN UNA UNIDAD PRODUCTIVA

Para planificar el riego en una unidad productiva, debe determinarse la provisión de agua en términos de un caudal seguro, confiable y permanente en el tiempo, en especial durante las épocas relativamente secas. Si en estas temporadas, la disponibilidad de agua en las fuentes no llena los requerimientos de riego, es necesario estimar los caudales durante la época relativamente lluviosa para calcular técnica y económicamente la factibilidad de almacenar los excedentes de estas aguas y utilizarlas en los períodos de riego. La planificación de los sistemas de abastecimiento y aplicación de agua se debe hacer teniendo en cuenta la reglamentación de la autoridad ambiental en la jurisdicción respectiva, por ejemplo, la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), en el caso del departamento del Valle del Cauca.

# CAUDAL DISPONIBLE POR UNIDAD DE ÁREA

El caudal disponible por unidad de área en una fuente de agua para riego ( $Q_d$  en l/s por ha) se calcula como la relación entre el caudal real captado en la fuente ( $Q_{fd}$  en l/s) durante la jornada de riego diaria y el área a regar ( $A_\Gamma$  en ha), de la siguiente forma:

$$Q_d = \frac{Q_{fd}}{A_r}$$

En los predios que no cuentan con un embalse o reservorio para almacenar agua, el caudal real captado en la fuente durante la jornada diaria de riego  $(Q_{fd})$  corresponde a una fracción del caudal asignado mediante una concesión de agua superficial o subterránea, teniendo en cuenta que, durante las épocas secas, los caudales disponibles disminuyen.

EJEMPLO

### Caudal disponible en una unidad productiva

En una finca de 50 ha, la Corporación Autónoma Regional autorizó una concesión de agua superficial de 50 l/s sobre la cual se quiere conocer el caudal disponible para riego por unidad de área ( $Q_d$  en l/s por ha). Para el cálculo, se determina el caudal real captado en la fuente  $(Q_{fd})$ durante la jornada de riego diaria, que corresponde a una fracción del caudal asignado. En la zona azucarera de Colombia, se estima que esta fracción es de 0.6, la cual se multiplica por el caudal asignado y el resultado equivale al caudal real captado durante la jornada de riego; por tanto, el caudal real captado durante el día en la fuente es:

$$Q_{fd} = F_d * Q_t$$

Donde:

- $F_d$ : fracción del caudal asignado = 0.6
- $Q_t$ : asignación total = 50 l/s
- $Q_{fd}$ : 0.6 \* 50 l/s = 30 l/s

El caudal disponible para riego por unidad de área sería:

$$Q_d = \left(\frac{30 \text{ l/s}}{50 \text{ ha}}\right) = \frac{0.6 \text{ l/s}}{\text{ha}}$$

Si existe un embalse para almacenar agua durante los períodos que no se aplica riego, por ejemplo, en horas nocturnas, fines de semana o en época de lluvias, el caudal disponible para riego es igual al caudal equivalente de salida diurno para el sistema fuente, el cual se puede determinar sumando el caudal real captado en la fuente más el caudal suministrado por el embalse, que es calculado como se explica más adelante.

# CAUDAL DE MANEJO POR OPERARIO DE RIEGO (Qmr)

Se estima que un operario de riego por gravedad, en la zona azucarera de Colombia, puede manejar un caudal entre 60 l/s y 100 l/s, cuando se tiene un canal abierto construido sobre suelo limpio en la cabecera de cada campo (acequia regadora). Si se emplea tubería de PVC o politubular con compuertas, en reemplazo de la acequia regadora, el mismo operario puede manejar entre 80 l/s y 120 l/s.

# NÚMERO DE OPERARIOS DE RIEGO NECESARIOS POR PREDIO ( $N_r$ )

El número de operarios que se requiere para riego en un predio  $(N_r)$ , de acuerdo con la cantidad de agua disponible, se calcula como la relación entre el caudal captado en la fuente  $(Q_{fd})$  y el caudal de manejo por operario de riego, de la siguiente forma:

$$N_r = \frac{Q_{fd}}{Q_{mr}}$$

En el caso de una unidad productiva, donde el caudal entregado en la fuente  $(Q_{fd})$  es de 140 l/s, y el caudal de manejo por operario es de 70 l/s, se obtiene el número de operarios de riego requeridos:

$$N_r = \frac{140 \text{ l/s}}{70 \text{ l/s}} = 2 \text{ operarios de riego}$$

# ÁREA REGADA POR DÍA Y POR OPERARIO (Ard)

Se estima que en la zona azucarera de Colombia, un operario de riego por surcos convencional, en una jornada laboral de 8 h, puede regar entre 1.2 ha y 2 ha  $(A_{op})$ . Cuando la jornada es de 10 h, este valor se debe multiplicar por 10/8 y si es de 12 h, por 12/8. En consecuencia, el área que puede regar un operario en un sistema por surcos en una jornada de 10 h corresponde a un rango entre 1.5 ha y 2.5 ha, según el cálculo:

- 1.2 ha \* (10/8) = 1.5 ha
- 2 ha \* (10/8) = 2.5 ha

De la misma manera, el área que puede regar en una jornada de 12 h varía entre 1.8 ha y 3 ha:

- 1.2 ha \* (12/8) = 1.8 ha
- 2.0 ha \* (12/8) = 3 ha

El área que se puede regar por día mediante el método de riego por surcos  $(A_{rd})$  se calcula como:

$$A_{rd} = N_r * A_{op}$$

Donde:

- $N_r$ : número de operarios necesarios para riego.
- A<sub>op</sub>: área que puede regar por día un operario en sistema por surco.

#### EJEMPLO

### Área regada por día

El número de operarios de riego en una finca es de dos, y se quiere conocer el área que pueden regar por día  $(A_{rd})$  con el sistema de surco, considerando una jornada diaria de riego de 12 h y un área de riego por operario de 2.4 ha/d. La operación sería:

$$A_{rd} = N_r * A_{op} = {^2 \text{ operatios} \atop \text{de riego}} * 2.4 \text{ ha/d} = 4.8 \text{ ha/d}$$

### CAUDAL REAL CAPTADO EN UN CAUCE SUPERFICIAL

El caudal real captado en un cauce superficial en horas diurnas (6:00 a.m. a 6:00 p.m.), nocturnas (6:00 p.m. a 6:00 a.m.) y los fines de semana, se debe medir, en lo posible, en la fuente, ya que al comienzo de las épocas de baja precipitación, generalmente, se capta el 100% del agua asignada, pero cuando el período seco se prolonga, por ejemplo, cuando ocurre el fenómeno de El Niño, la cantidad real que se capta es menor que el caudal asignado.

No obstante, en la mayoría de las fuentes de agua superficial no se hacen estas mediciones, por lo que el caudal asignado debe ser ajustado por un factor de ajuste (F), dependiendo de la hora o el día de la captación:

- Diurno (F<sub>d</sub>), entre 0.6 y 0.8
- Nocturno (F<sub>n</sub>), entre 0.7 y 0.9
- Fin de semana ( $F_{fS}$ ), entre 0.8 y 0.95.

En el caso del valle geográfico del río Cauca, los datos a tener en cuenta son los siguientes:

 Para el caudal real captado diurno en la fuente:

$$Q_{fd}(1/s) = F_d * Q_t$$

Con un  $F_d$  de 0.6 y una  $Q_t$  o asignación total en l/s.

 Para el caudal real captado nocturno en la fuente:

$$Q_{fn}(1/s) = F_n * Q_t$$

Con un  $F_n$  de 0.7.

 Para el caudal real captado en la fuente durante el fin de semana:

$$Q_{fS}(1/s) = F_{fS} * Q_t$$

Con un  $F_{fS}$  de 0.8.

#### **EJEMPLO**

# Cómo estimar el caudal real de una fuente

La autoridad ambiental ha asignado un caudal de 100 l/s de agua de un cauce superficial a un predio, pero no se cuenta con aforos en dicha fuente. Así pues, se quieren estimar los caudales reales que se pueden captar durante el día, la noche y los fines de semana. Aplicando las relaciones anteriores, se tiene:

• Diurno (*Q*<sub>fd</sub>):

$$Q_{fd} = F_d * Q_t = 0.6 * 100 \text{ l/s} = 60 \text{ l/s}$$

• Nocturno (*Q<sub>fn</sub>*):

$$Q_{fd} = F_n * Q_t = 0.7 * 100 \text{ l/s} = 70 \text{ l/s}$$

• Durante el fin de semana  $(Q_{fs})$ :

$$Q_{fS} = F_{fS} * Q_t = 0.8 * 100 \text{ l/s} = 80 \text{ l/s}$$

### CAUDAL REAL CAPTADO EN UN POZO PROFUNDO

Para conocer la cantidad de agua que se extrae de un pozo profundo, existen diferentes métodos y equipos de aforo, los cuales se detallan en el Capítulo 4 de este libro. Para determinar los caudales reales de un pozo profundo, los aforos deben ser realizados durante las jornadas diurna y de fin de semana, y no partir del caudal teórico del pozo, ya que este caudal puede disminuir por la interferencia entre niveles de bombeo, debido a la cercanía de otros pozos en la zona, la reducción en la recarga de agua subterránea durante la época seca, o por fallas o deterioro del pozo.

En el valle geográfico del río Cauca, la autoridad ambiental exige que todos los pozos tengan instalado un aforador funcionando en buen estado. En los casos excepcionales donde no se cuente con estas mediciones, al caudal teórico del pozo  $(Q_t)$  se le deben aplicar unos factores de ajuste (F) sugeridos, según sea durante el día, la noche o el fin de semana.



Estructura de división de agua.

En general, para nuestra región, los valores de los factores de ajuste que se han encontrado, en relación con la captación de agua subterránea mediante pozo profundo, son los siguientes:

- Diurno  $(F_d) = 0.8$
- Nocturno  $(F_n) = 0.9$
- Fin de semana  $(F_{fs}) = 0.9$

Con base en el caudal teórico del pozo ( $Q_t$  en I/s), los caudales reales de pozos profundos se pueden calcular así:

- Diurno ( $Q_{fd}$  en I/s) =  $F_d * Q_t$
- Nocturno  $(Q_{fn} \text{ en } 1/s) = F_n * Q_t$
- Fin de semana  $(Q_{fS} \text{ en I/s}) = F_{fS} * Q_t$

### CAUDAL EQUIVALENTE SUMINISTRADO POR UNA FUENTE DE AGUA CON EMBALSE

En los predios donde la fuente está compuesta por un cauce superficial o un pozo profundo más un embalse, el procedimiento para determinar el caudal equivalente suministrado por el sistema fuente durante las horas de operación del riego (12 h/d en nuestro medio) se describe a continuación.

# Cauce superficial más embalse de regulación semanal

El embalse de regulación semanal es aquel que se llena durante el fin de semana, aprovechando la suspensión de la operación de riego, es decir, el caudal disponible en la fuente se conduce hacia un reservorio para ser utilizado en el riego durante la semana.

### PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR EL CAUDAL DE UN EMBALSE DE REGULACIÓN SEMANAL

En este caso, el caudal equivalente diurno suministrado en el sistema fuente se calcula de la siguiente forma:

1. Se mide el caudal real captado en la fuente entre semana tanto en el día como en la noche y durante el fin de semana. Los datos obtenidos se tabulan así:

Diurno: (Q<sub>fd</sub> en l/s)
Nocturno: (Q<sub>fn</sub> en l/s)

• Fines de semana:  $(Q_{fs} \text{ en I/s})$ 

- 2. Se contabiliza el número de horas diarias de almacenamiento de agua en el embalse entre semana (por ejemplo, de lunes a viernes, de 6:00 p.m. a 6:00 a.m. cada día) y durante el fin de semana (de 6:00 p.m. del sábado a 6:00 a.m. del lunes), así como el número de horas diurnas de uso del sistema fuente. Esta información se puede registrar de la siguiente manera:
  - Diario entre semana ( $T_{aes}$  en horas).
  - Durante el fin de semana ( $T_{afs}$  en horas).

- Uso diario del embalse para riego (T<sub>ud</sub> en horas).
- Total de uso del embalse por semana ( $T_{us}$  en horas).
- **3.** El caudal total que puede entregar el sistema cauce-embalse ( $Q_{et}$ ) se fracciona en tres caudales, así:
  - Diurno (*Q<sub>ed</sub>*):

$$(Q_{ed} \text{ en } l/s) = Q_{fd}$$

Nocturno (Q<sub>en</sub>):

$$Q_{en} = Q_{fn} * (T_{aes}/T_{ud})$$

• Fin de semana ( $Q_{efs}$ ):

$$Q_{efs} = Q_{fs} * (T_{afs}/T_{us})$$

4. Finalmente, se calcula el caudal equivalente total suministrado por el embalse de regulación semanal durante la jornada diaria de operación de riego, utilizando esta ecuación:

$$Q_{et} = Q_{ed} + Q_{en} + Q_{efs}$$

#### **EJEMPLO**

# Cálculo del caudal equivalente suministrado por un cauce superficial más un embalse

En un predio, se tiene una asignación de 70 l/s desde un cauce superficial, pero entre semana, de lunes a sábado, el caudal de entrega en la fuente durante el día (de 6:00 a.m. a 6:00 p.m.) es de 42 l/s, en la noche (de 6:00 p.m. a 6:00 a.m.) es de 49 l/s, y los fines de semana (de 6:00 p.m. del sábado a 6:00 a.m. del lunes) es de 56 l/s. Además, se cuenta con un embalse que se llena en la noche de lunes a viernes entre 6:00 p.m. y 6:00 a.m. y durante el fin de semana entre 6:00 p.m. del sábado y 6:00 a.m. del lunes. El embalse es utilizado entre lunes y sábado de 6:00 a.m. a 6:00 p.m. Para conocer, en este caso, el caudal equivalente total diurno suministrado por esta fuente  $(Q_{et})$ , se procede de la siguiente forma:

1. Se tabulan los caudales reales captados en la fuente, así:

• Diurno:  $Q_{fd} = 42 \text{ l/s}$ 

• Nocturno: Qfn= 49 l/s

• Fines de semana:  $Q_{fs} = 56 \text{ l/s}$ 

2. Se calcula el número de horas diarias de almacenamiento de agua en el embalse durante la semana (lunes a sábado) y el fin de semana (sábado y domingo), así como el número de horas diurnas de uso del sistema fuente:

- Tiempo de almacenamiento diario entre semana:  $(T_{aes}$  en horas) = 12 h
  - Tiempo de uso diario del embalse para riego:  $(T_{ud}$  en horas) = 12 h
  - Tiempo de almacenamiento durante el fin de semana:  $(T_{afs}$  en horas) = 36 h (Desde las 6:00 p.m. del sábado a las 6:00 a.m. del lunes)
  - Tiempo total de uso del almacenamiento por semana:  $(T_{us}) = 72 \text{ h}$  (De lunes a sábado, 12 h cada día)
- **3.** Se descompone el caudal equivalente total suministrado por el embalse  $(Q_{et})$  en tres caudales:
  - En relación con el caudal que recibe del cauce durante el día  $(Q_{ed})$ :

$$Q_{ed} = 42 \text{ l/s}$$

• En función del caudal que recibe del cauce durante la noche  $(Q_{en})$ :

$$Q_{en} = Q_{fn} * (T_{aes}/T_{ud}) = 49 \text{ l/s} * (12 \text{ h/12 h}) = 49 \text{ l/s}$$

• En relación con el caudal que recibe del cauce durante el fin de semana ( $Q_{efs}$ ):

$$Q_{efs} = Q_{fs} * (T_{afs}/T_{us}) = 56 \text{ l/s} * (36/72) = 28 \text{ l/s}$$

**4.** Finalmente, se calcula el caudal equivalente total suministrado por el embalse de regulación semanal durante la jornada diaria de operación de riego  $(Q_{et})$ :

$$Q_{et} = Q_{ed} + Q_{en} + Q_{efs} = 42 \text{ l/s} + 49 \text{ l/s} + 28 \text{ l/s} = 119 \text{ l/s}$$

### Cauce superficial más embalse de regulación en época lluviosa

El embalse de regulación en época lluviosa es aquel que se llena durante la época de alta precipitación, aprovechando que no se aplica riego, es decir, el caudal disponible en la fuente se almacena para ser utilizado en el riego durante la época seca.

# PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR EL CAUDAL DE UN EMBALSE DE REGULACIÓN EN ÉPOCA LLUVIOSA

En este caso, el caudal equivalente total suministrado en la fuente se calcula de la siguiente forma:

**1.** Se determina el caudal real captado durante el día en el cauce superficial ( $Q_{fd}$  en l/s).

$$Q_{fd} = F_d * Q_t$$

Donde:

- $F_d$ : factor diurno: 0.6 para la zona azucarera de Colombia.
- Q<sub>t</sub>: asignación total (l/s).
- **2.** Se debe conocer la capacidad de almacenamiento del embalse ( *V* en m<sup>3</sup>).
- **3.** Se estima el número de días durante los cuales se usará el embalse en la temporada seca (*N<sub>dr</sub>*) que, para el caso del valle geográfico del río Cauca, sería de 60, ya que al total de la temporada más seca del año (90 días) se le descuentan los fines de semana, festivos y días en que se suspenden los riegos por razones diversas.
- **4.** Se determina el tiempo de uso diario del embalse para riego ( $T_{ud}$  en horas). El valor más utilizado en la región es de 12 h.
- 5. Se descompone el caudal que puede suministrar el embalse (Q<sub>et</sub>) en:

• Caudal que entrega el embalse en relación con el caudal que recibe del cauce durante el día ( $Q_{ed}$ ):

$$(Q_{ed} \text{ en I/s}) = Q_{fd}$$

 Caudal que puede entregar el embalse de acuerdo con el caudal que recibe en la noche durante el período de riego  $(Q_{en})$ :

$$Q_{en} = Q_{fn} * (T_{aes}/T_{ud})$$

• Caudal que entrega el embalse en función del caudal que recibe del cauce el fin de semana durante la época de riego  $Q_{efs}$ :

$$Q_{efs} = Q_{fs} * (T_{afs}/T_{us})$$

• Caudal que entrega el embalse  $(Q_{al})$  en relación con la capacidad de almacenamiento, el tiempo total de uso durante la época de riego y la jornada diaria de operación de riego. El Qal se calcula así:

$$Q_{al} = \frac{V}{N_{dr} * T_{ud} * 3.6}$$

#### Donde:

- V: capacidad del embalse (m<sup>3</sup>).
- N<sub>dr</sub>: número de días de uso del embalse en la temporada seca.
- T<sub>ud</sub>: tiempo de uso diario del embalse en horas.

En esta ecuación, el valor 3.6 corresponde al factor de conversión de m<sup>3</sup>/h a l/s:  $1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ l y } 1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$ 

6. Se calcula el caudal equivalente total suministrado por el embalse de regulación en época lluviosa durante la jornada diaria de operación de riego:

$$Q_{et} = Q_{ed} + Q_{en} + Q_{efs} + Q_{al}$$

#### **EJEMPLO**

Caudal equivalente en un embalse de regulación en la época lluviosa

En un conjunto de predios, se cuenta con una asignación total de 70 l/s y un embalse que almacena agua durante la época de lluvias con una capacidad de 200,000 m<sup>3</sup> y que opera durante la época seca por espacio de 60 días, 12 horas por día. Para conocer el caudal equivalente total suministrado por el embalse para riego ( $Q_{et}$  en l/s), se procede así:

1. Se determina el caudal real captado durante el día en el cauce superficial ( $Q_{fd}$ ):

$$Q_{fd} = F_d * Q_t = 0.6 * 70 = 42 \text{ l/s}$$

- 2. La capacidad de almacenamiento del embalse (V en m $^3$ ) es de 200,000 m $^3$ .
- 3. El número de días a regar durante la temporada seca ( $N_{dr}$ ) es 60.
- 4. El tiempo de uso diario del embalse para riego ( $T_{ud}$ ) es de 12 h.
- 5. El caudal total que puede entregar el embalse  $(Q_{et})$  se compone de cuatro caudales:

• Caudal que entrega el embalse en relación con el caudal que recibe del cauce durante el día ( $Q_{ed}$ ):

$$Q_{ed} = Q_{fd} = 42 \text{ l/s}$$

• Caudal que entrega el embalse en relación con el caudal que recibe del cauce en la noche durante el período de riego  $(Q_{en})$ :

$$Q_{en} = Q_{fn} * T_{aes}/T_{ud} = 49 \text{ l/s} * 12 \text{ h/12 h} = 49 \text{ l/s}$$

· Caudal que entrega el embalse en función del caudal que recibe del cauce el fin de semana durante la época de riego  $(Q_{efs})$ :

$$Q_{efs} = Q_{fs} * T_{afs}/T_{US} = 56 \text{ l/s} * 36/72 = 28 \text{ l/s}$$

• Caudal que entrega el embalse en función de la capacidad de almacenamiento y el tiempo total de uso durante la época de riego y la jornada diaria de operación del riego:

$$Q_{al} = \frac{V}{N_{dr} * T_{ud} * 3.6}$$

$$Q_{al} = \frac{200,000 \text{ m}^3}{60 \text{ d} * 12 \text{ h/d} * 3.6} = 77.2 \text{ l/s}$$

**6.** El caudal equivalente total suministrado por el embalse de regulación en época lluviosa, durante la jornada diaria de operación del riego es:

$$Q_{et} = Q_{ed} + Q_{en} + Q_{efs} + Q_{al} = 42 + 49 + 28 + 77.2 = 196.2 \text{ l/s}$$

#### Pozo profundo más reservorio

El reservorio que se construye para almacenar agua subterránea extraída mediante un pozo profundo, normalmente, se considera de regulación semanal, puesto que se llena durante el fin de semana aprovechando la suspensión de la operación de riego y se utiliza en el riego durante el resto de la semana.

#### PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR EL CAUDAL DE UN POZO PROFUNDO MÁS RESERVORIO

El caudal equivalente de entrega durante el día para un pozo que descarga el agua a un reservorio se puede calcular de la siguiente forma:

- 1. Se miden los caudales reales del pozo durante el día, en la noche y el fin de semana. Si no es posible el aforo, se debe multiplicar el caudal teórico del pozo  $(Q_t)$  por los factores de ajuste, sugeridos para la región azucarera de Colombia:
  - Diurno  $(F_d) = 0.8$
  - Nocturno  $(F_n) = 0.9$
  - Fin de semana  $(F_{fS}) = 0.9$

Por tanto, los caudales reales captados de pozos profundos se pueden calcular de la siguiente manera:

- Durante el día:  $Q_{fd} = 0.8 * Q_t$
- Durante la noche:  $Q_{fn} = 0.9 * Q_t$
- Durante el fin de semana:  $Q_{fS} = 0.9 * Q_t$

- 2. Se calculan los tiempos de almacenamiento y uso del reservorio:
  - Almacenamiento diario entre semana  $(T_{aes}$  en horas).
  - Uso diario del reservorio para riego ( $T_{ud}$  en horas).
  - Almacenamiento durante el fin de semana (T<sub>afs</sub> en horas).
  - Total de uso del almacenamiento por semana ( $T_{US}$  en horas).
- 3. Como en el caso anterior de cauce superficial más reservorio de regulación semanal, el caudal equivalente total suministrado por el embalse ( $Q_{et}$ ) se descompone en tres caudales:
  - Diurno (Q<sub>ed</sub>):

 $Q_{ed}$  = caudal diurno real del pozo ( $Q_{fd}$ )

• Nocturno (Q<sub>en</sub>):

$$Q_{en} = Q_{fn} * T_{aes}/T_{ud}$$

 Caudal que entrega el embalse en relación con el caudal que recibe del pozo durante el fin de semana (Q<sub>efs</sub>):

$$Q_{efs} = Q_{fs} * T_{afs} / T_{us}$$

**4.** El caudal equivalente total suministrado por el embalse sería:

$$Q_{et} = Q_{ed} + Q_{en} + Q_{efs}$$

#### **EJEMPLO**

## Caudal equivalente en un pozo profundo más reservorio

Un predio cuenta con un pozo profundo cuyo caudal es de 60 l/s durante el día  $(Q_{fd})$ , 70 l/s en la noche  $(Q_{fn})$  y 80 l/s en el fin de semana  $(Q_{fs})$ . Además, tiene un reservorio que recibe agua del pozo de lunes a viernes entre 6:00 p.m. y 6:00 a.m., y el fin de semana desde las 6:00 a.m. del sábado hasta las 6:00 a.m. del domingo. El pozo se apaga para que se recupere desde las 6:00 a.m. del domingo hasta las 6:00 a.m. del lunes. Los tiempos de almacenamiento y uso del pozo son los siguientes:

• 
$$T_{aes} = 12 \text{ h}$$

• 
$$T_{ud} = 12 \text{ h}$$

• 
$$T_{afs} = 12 \text{ h}$$

• 
$$T_{US} = 72 \text{ h}$$

El caudal equivalente total suministrado por el reservorio ( $Q_{et}$ ) se descompone en tres caudales, así:

- 1. Caudal entregado por el reservorio en relación con el caudal que recibe del pozo durante el día  $(Q_{ed})$  = caudal diurno real del pozo  $(Q_{fd})$  = 60 l/s
- 2. Caudal entregado por el reservorio en función del caudal que recibe del pozo durante la noche  $(Q_{en})$ :

$$Q_{en} = Q_{fn} * \left(\frac{T_{aes}}{T_{ud}}\right) = 70 * \left(\frac{12}{12}\right) = 70 \text{ l/s}$$

**3.** Caudal entregado por el reservorio en relación con el caudal que recibe del pozo durante el fin de semana  $(Q_{efs})$ :

$$Q_{efs} = Q_{fs} * \left(\frac{T_{afs}}{T_{US}}\right) = 80 * \left(\frac{12}{72}\right) = 13 \text{ l/s}$$

El caudal equivalente total suministrado por el reservorio sería:

$$Q_{et} = Q_{ed} + Q_{en} + Q_{efs} = 60 + 70 + 13 = 143 \text{ l/s}$$

Si en el ejemplo anterior, el pozo se opera durante 16 horas diarias, el tiempo de almacenamiento diario entre semana ( $T_{aes}$ ) será de 4 horas (6 p.m. - 10 p.m.). Por tanto, el caudal entregado por el reservorio, en relación con el caudal que recibe del pozo durante la noche será:

$$Q_{en} = 70 * (4/12) = 23 \text{ l/s}$$

En este caso, el caudal equivalente total del sistema pozo-embalse corresponderá a:

$$Q_{et} = 60 + 23 + 13 = 96 \text{ l/s}$$

## DEMANDA DE AGUA PARA RIEGO EN UNA UNIDAD PRODUCTIVA

Este tema, denominado también requerimiento de riego en la fuente de agua, se trata en detalle en el Capítulo 2 de este libro. En esta sección, se presentan algunos ejemplos con el propósito de ayudar al desarrollo de habilidades para el cálculo de la demanda de agua en el cultivo de la caña de azúcar, y en el contexto del balance de oferta y demanda de agua para riego en una unidad productiva.

El requerimiento de riego en la fuente se determina utilizando la siguiente ecuación:

$$RRf = \frac{RRn}{Er}$$

#### Donde:

- RRf: requerimiento de riego en la fuente (mm/d).
- RRn: requerimiento de riego neto (mm/d).
- Er: eficiencia de riego expresada en fracción decimal, la cual se puede calcular como:

$$Er = Ea * Ec * Eal$$

#### Donde:

- Ea: eficiencia de aplicación (en fracción decimal).
- *Ec*: eficiencia de conducción (en fracción decimal).
- Eal: eficiencia de almacenamiento en reservorios o embalses, si existen (en fracción decimal).



Cultivo de caña de azúcar en el valle del Cauca.

#### REQUERIMIENTO DE RIEGO

El requerimiento de riego neto (RRn) se calcula mediante la ecuación:

$$RRn = ET - Pe$$

#### Donde:

- ET: evapotranspiración actual expresada en milímetros por mes (mm/mes).
- Pe: precipitación efectiva (mm/mes) con una probabilidad de ocurrencia de 75%.

#### PRECIPITACIÓN EFECTIVA

Se define como la fracción de la precipitación total que llega hasta el suelo y puede ser aprovechada por el cultivo (Doorenbos y Pruitt, 1992).

#### **EJEMPLO**

## Cálculo de la precipitación efectiva en la zona centro del valle geográfico del río Cauca

Determinar la precipitación efectiva mensual con una probabilidad de ocurrencia de 75% para la zona centro del valle geográfico del río Cauca donde se presenta la menor precipitación en la región.

- En el Cuadro 3.1 se muestra la precipitación media mensual registrada en la zona centro del valle geográfico del río Cauca.
- 2. Se ordenan en forma descendente los datos de precipitación anual (Cuadro 3.2); se asigna un número de orden a cada valor de precipitación (Cuadro 3.2, columna 3), y se calcula la frecuencia relativa (F) de cada valor de precipitación anual ya ordenado (Cuadro 3.2, columna 4), mediante la siguiente fórmula:

$$F = \frac{m}{n+1} * 100$$

#### Donde:

- m: número de orden asignado a cada valor de precipitación.
- *n*: número total de eventos, en este caso, *n* = 21.
- 3. Se elabora un gráfico de dispersión con los valores de frecuencia relativa (F) en el eje X y la precipitación anual en el eje Y (Figura 3.1), y se traza la línea de tendencia de tipo lineal para obtener la ecuación de la línea de mejor ajuste. En el ejemplo de la zona centro del valle geográfico del río Cauca, la ecuación obtenida es:

$$Y = 1253.6 - 6.1744X$$

Cuadro 3.1 Precipitación mensual multianual, zona centro del valle geográfico del río Cauca.

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
1994	69	88	138	164	129	35	19	33	83	131	157	75	1120
1995	15	19	79	132	66	51	68	47	81	160	86	75	878
1996	37	76	154	149	145	82	44	36	57	104	58	63	1005
1997	135	39	103	132	71	118	1	1	67	81	175	26	947
1998	7	33	126	131	158	61	42	49	126	46	92	38	909
1999	85	142	87	186	82	72	9	40	100	112	101	81	1096
2000	68	101	82	84	137	36	48	35	69	60	99	42	862
2001	59	42	83	34	68	33	26	1	59	50	51	103	610
2002	20	18	148	79	37	43	50	28	43	108	64	78	714
2003	14	59	54	152	58	44	25	37	47	95	132	27	743
2004	57	30	22	87	88	22	40	11	62	137	144	53	753
2005	47	35	81	84	91	28	28	36	53	122	101	88	794
2006	75	62	161	171	81	111	20	17	19	92	117	92	1019
2007	61	23	71	183	113	40	45	93	27	151	62	111	979
2008	86	109	105	140	202	134	58	105	44	72	73	115	1245
2009	108	44	156	50	64	81	13	34	20	71	47	87	775
2010	12	33	33	208	123	102	99	29	83	114	312	144	1291
2011	34	107	110	200	79	68	74	22	45	161	126	137	1163
2012	142	69	79	189	55	58	19	60	20	164	72	53	979
2013	16	74	94	124	212	23	17	56	54	138	66	103	977
2014	72	98	113	116	86	42	9	23	41	126	163	95	985
Prom.	58	62	99	133	102	61	36	38	57	109	109	80	945

Fuente: Área de meteorología de Cenicaña.

Que expresada en los términos de precipitación (P) y frecuencia (F) sería:

$$P = 1253.6 - 6.1744F$$

- **4.** Una vez se obtiene la ecuación de la precipitación en función de la frecuencia, se calcula la precipitación anual que corresponde a la frecuencia de 75%. En este ejemplo, es de 791 mm.
- 5. Se divide el valor encontrado de precipitación anual para una frecuencia de 75%, entre la precipitación media anual, así:

$$\frac{791 \text{ mm}}{945 \text{ mm}} = 0.84$$

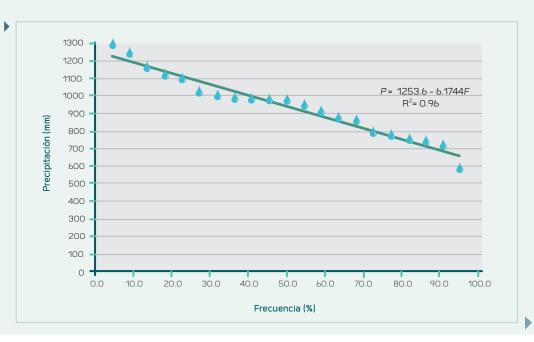
- **6.** El cociente resultante se multiplica por la precipitación media de cada mes para obtener la precipitación mes a mes con probabilidad de 75% (Cuadro 3.3).
- 7. Este último valor se multiplica por 0.9 para los meses secos y por 0.8 para los meses lluviosos (Alarcón y Cruz, 2012), con el objetivo de obtener la precipitación efectiva mensual con 75% de probabilidad (Cuadro 3.4).

Cuadro 3.2
Precipitación anual en orden descendente y frecuencia relativa calculada para la zona centro del valle del río Cauca.

7		1		
	Año	Prec. anual (mm)	No. de orden (m)	Frecuencia relativa, F* (%)
	2010	1291	1	4.5
	2008	1245	2	9.1
	2011	1163	3	13.6
	1994	1120	4	18.2
	1999	1096	5	22.7
	2006	1019	6	27.3
	1996	1005	7	31.8
	2014	985	8	36.4
	2012	979	9	40.9
	2007	979	10	45.5
	2013	977	11	50.0
	1997	947	12	54.5
	1998	909	13	59.1
	1995	878	14	63.6
	2000	862	15	68.2
	2005	794	16	72.7
	2009	775	17	77.3
	2004	753	18	81.8
	2003	743	19	86.4
	2002	714	20	90.9
	2001	610	21	95.5

\* Frecuencia relativa (n) = 21

Figura 3.1 Línea de mejor ajuste con los valores de frecuencia en el eje X y precipitación anual en el eje Y. Zona centro del valle geográfico del río Cauca. La precipitación anual que corresponde a la frecuencia de 75% es 791 mm.



#### Cuadro 3.3

Precipitación mensual con probabilidad de ocurrencia de 75%. Zona centro del valle geográfico del río Cauca.

Detalle	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Promedio	58	62	99	133	102	61	36	38	57	109	109	80
Factor para calcular la precipitación con frecuencia de 75%	0.84	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
Precipitación con frecuencia de 75%	49	52	83	111	85	51	30	32	48	91	91	67

#### Cuadro 3.4

Precipitación efectiva mensual con probabilidad de ocurrencia de 75%. Zona centro del valle geográfico del río Cauca.

Detalle	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Precipitación con frecuencia de 75%	49	52	83	111	85	51	30	32	48	91	91	67
Factor para calcu- lar la precipitación efectiva	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9
Precipitación efectiva ( <i>Pe</i> ) con frecuencia de 75%	44	47	66	89	68	46	27	28	43	73	73	60

#### **EJEMPLO**

#### Determinar el requerimiento de riego en la fuente de agua

En el ejemplo anterior, se obtuvo el valor de la precipitación efectiva mensual con una probabilidad del 75%. A continuación, se calcula el requerimiento de riego en la fuente, para lo cual, se pueden utilizar dos métodos:

1. Basado en el volumen de agua aplicado por evento de riego y la lámina de agua rápidamente aprovechable (LARA), se le conoce como requerimiento de riego operativo en la fuente de agua y se considera práctico para las unidades productivas que utilizan riego por surcos.

2. Basado en la eficiencia de riego, se le conoce como requerimiento de riego en la fuente de agua a largo plazo.

## Cálculo del requerimiento de riego operativo en la fuente de agua para la zona centro del valle geográfico del río Cauca

1. Se elabora un cuadro en Excel® con la siguiente información: precipitación efectiva mensual con una frecuencia de 75% y evaporación me-

- dia mensual multianual calculada a partir del dato diario medido en el tanque clase A (Cuadro 3.5).
- 2. Se calcula la evapotranspiración mensual del cultivo de la caña de azúcar, multiplicando el valor de la evaporación media mensual multianual por el factor *K*, definido como la relación entre la evapotranspiración actual (*ET*) y la evaporación medida en el tanque clase A (*E*), cuyo valor medio encontrado por Cenicaña para edades de caña de más de 4 meses es de 0.7 (Cuadro 3.6, fila 3).
- **3.** Se calcula el requerimiento de riego neto (*RRn*) mensual restando la precipitación efectiva (*Pe*) de la evapotranspiración (*ET*), como se muestra en el Cuadro 3.6, fila 4.
- 4. Se determina el *RRn* acumulado para cada uno de los dos períodos secos que ocurren entre junio 15 y septiembre 15, y entre diciembre 15 y marzo 15 (Cuadro 3.6, filas 5 y 6). Este cálculo se realiza sumando los valores positivos de *RRn* desde junio hasta septiembre (41 + 74 + 82 + 64 = 261 mm), mientras que para el otro período se suman los valores positivos desde diciembre hasta marzo (33 + 57 + 49 + 35 = 175 mm).
- **5.** Se calcula el requerimiento de riego operativo (*RRop*), expresado como caudal equi-

valente o módulo de riego operativo (*Mop*, en l/s por ha), utilizando la ecuación:

$$RRop = \frac{V}{(I * 12 * 3.6)}$$

#### Donde:

- V: volumen de agua aplicado por cada evento de riego (m³/ha).
- I: intervalo de riego requerido (d), calculado como el número de días que dura la temporada más seca (en la región del valle geográfico del río Cauca es de 90 días), dividido entre el número de riegos requeridos en la temporada más seca. A su vez, el número de riegos se determina dividiendo el requerimiento de riego neto acumulado (mm) de la temporada más seca entre el valor de la lámina de agua rápidamente aprovechable (LARA, en mm).

Cabe anotar que en la ecuación de *RRop*, los valores de 12 y 3.6 que figuran en el denominador se refieren a la labor de riego realizada durante 12 horas por día. El valor de 3.6 resulta de dividir 3600 segundos, que tiene una hora, entre 1000, que son los litros que contiene un metro cúbico. Sin embargo, si la jornada de riego es diferente (de 10 horas u otro valor), se considera este número en lugar de 12.

Cuadro 3.5
Precipitación efectiva y evaporación media mensual multianual calculada a partir del dato medido en el tanque clase A. Zona centro del valle geográfico del río Cauca.

Detalle	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Precipitación efectiva ( <i>Pe</i> ) con frecuencia de 75%	44	47	66	89	68	46	27	28	43	73	73	60
Evaporación ( <i>EV</i> ) (mm)	144	136	145	130	128	124	145	157	153	144	129	134

#### Cuadro 3.6

Evapotranspiración mensual del cultivo de la caña de azúcar (ET = E \* 0.7) y requerimiento de riego neto (RRn = ET - Pe). Zona centro del valle geográfico del río Cauca.

Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Precipitación efectiva ( <i>Pe</i> ) con frecuencia de 75%	44	47	66	89	68	46	27	28	43	73	73	60
Evaporación ( <i>EV</i> ) (mm)	144	136	145	130	128	124	145	157	153	144	129	134
Evapotranspiración ( <i>ET</i> ) (mm)	101	95	102	91	90	87	101	110	107	101	90	94
Requerimiento de riego neto RRn = ET - Pe	57	49	35	2	21	41	74	82	64	28	17	33
RRn período seco jun. 15-sep. 15 (mm)	_	_	_	_	_	_	_	_	261	_	_	_
RRn período seco dic. 15- mar. 15 (mm)	_	175	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_

Se presenta el cálculo del requerimiento de riego operativo (*RRop*) en un lote sembrado en caña, en la zona centro del valle geográfico del río Cauca, con valor de la *LARA* del suelo de 60 mm y un volumen de agua aplicado por cada evento de riego por gravedad de 1500 m³/ha.

- Número de riegos requeridos en la temporada más seca del año: RRn acumulado en temporada más seca/LARA = 261 mm/60 mm = 4.34 riegos.
- Duración de la temporada más seca: 90 días.
- Intervalo de riego requerido:

$$I = 90 \text{ d/No. riegos} = 90 \text{ d/4.34 riegos} = 21 \text{ d}$$

• Requerimiento de riego operativo o módulo de riego operativo (RRop):

$$\frac{1500 \text{ m}^3/\text{ha}}{21 \text{ d} * 12 \text{ h/d} * 3.6} = 1.68 \text{ l/s por ha}$$

Número de riegos requeridos por año:

$$\frac{261 \text{ mm} + 175 \text{ mm}}{60 \text{ mm}} = 7 \text{ riegos por año}$$

## Determinación del requerimiento de riego en la fuente de agua a largo plazo

A partir del paso 4 del ejemplo de requerimiento del riego operativo en el cual se encontró el RRn para el periodo más seco (261 mm), se determa el requerimiento de riego neto diario (RRn, en mm/d), utilizando la siguiente ecuación:

$$RRn \ diario = \frac{RRn \ acumulado}{No. \ días \ época \ más \ seca} = \frac{261 \ mm}{90 \ d} = 2.9 \ mm/d$$

Luego, se calcula el requerimiento de riego en la fuente a nivel diario (*RRf*), así:

$$RRf$$
 diario = 
$$\frac{RRn \text{ diario}}{Ea * Ec * Eal}$$

#### Donde:

- Ea: eficiencia de aplicación (fracción decimal) = 0.5.
- Ec: eficiencia de conducción (fracción decimal) = 0.8.
- Eal: eficiencia de almacenamiento en reservorios o embalses, si los hay (fracción decimal).

$$RRf \text{ diario} = \frac{2.9 \text{ mm/d}}{(0.5 * 0.8)} = 7.2 \text{ mm/d}$$

A continuación, se calcula el módulo de riego a largo plazo (l/s por ha) para una jornada de 12 h/d:

$$7.2 \frac{\text{mm}}{\text{d}} * \frac{1 \text{ l/m}^2}{1 \text{ mm}} * \frac{1 \text{ d}}{12 \text{ h}} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} * \frac{10,000 \text{ m}^2}{1 \text{ ha}} = 1.68 \text{ l/s por ha}$$

Este módulo de riego a largo plazo (l/s por ha) para una operación continua de 24 h/d es:

$$7.2 \frac{\text{mm}}{\text{d}} * \frac{1 \text{ l/m}^2}{1 \text{ mm}} * \frac{1 \text{ d}}{86,400 \text{ s}} * \frac{10,000 \text{ m}^2}{1 \text{ ha}} = 0.84 \text{ l/s por ha}$$

## CÁLCULO DEL BALANCE HIDROLÓGICO DE OFERTA Y DEMANDA DE AGUA

Como se mencionó antes, este balance se define como la diferencia entre la oferta de agua a la que el predio o unidad productiva tiene derecho de uso y el requerimiento de riego en la fuente, expresado en litros por segundo (I/s).

#### **EJEMPLO**

#### Cálculo de balance hidrológico

Después de calcular el módulo de riego operativo, en el caso de riego por surcos en la zona centro del valle geográfico del río Cauca (que para el ejercicio desarrollado dio como resultado 1.68 l/s por ha), el valor se multiplica por el área neta de riego. Si el área es de 100 ha, la demanda de riego será de:

$$1.68 \text{ l/s} / \text{ha} * 100 \text{ ha} = 168 \text{ l/s}$$

Si la fuente de agua es de cauce superficial sin almacenamiento y la asignación total ( $Q_t$ ) es de 100 l/s, el caudal real captado diurno (l/s) corresponderá al 60% de la asignación total, o sea, 60 l/s. En este caso, la diferencia entre la oferta y la demanda será:

$$60 - 168 = -108 \text{ l/s}$$

El signo negativo indica que la oferta de agua no es suficiente para regar el área total que se requiere; por tanto, se debe llevar a cabo un desarrollo de aguas en la unidad productiva que consiste en construir y mejorar la infraestructura básica de captación y almacenamiento en alguna de las modalidades presentadas en este capítulo.

Por el contrario, si la fuente es de cauce superficial complementado con un embalse que se llena en las noches y los fines de semana, la oferta de agua del predio se podrá incrementar a 170 l/s y el balance entre la oferta y la demanda será:

$$170 - 168 = 2 \text{ l/s}$$

El valor de caudal equivalente suministrado por el sistema cauce embalse  $(Q_{et})$  y correspondiente a 170 l/s, se calculó de la siguiente forma:

$$Q_{et} = Q_{ed} + Q_{en} + Q_{efs}$$

#### Donde:

- Q<sub>ed</sub>: caudal entregado por el embalse en relación con el caudal que recibe del cauce durante el día.
- Q<sub>en</sub>: caudal entregado por el embalse en función del caudal que recibe del cauce durante la noche.
- Q<sub>efs</sub>: caudal entregado por el embalse de acuerdo con el caudal que recibe del cauce durante el fin de semana.

$$Q_{ed} = 100 \text{ l/s} * 0.6 = 60 \text{ l/s}$$
  
 $Q_{en} = 100 \text{ l/s} * 0.7 * 12 \text{ h/12 h} = 70 \text{ l/s}$   
 $Q_{efs} = 100 \text{ l/s} * 0.8 * 36 \text{ h/72 h} = 40 \text{ l/s}$ 

En caso de que una unidad productiva cuente con dos asignaciones de agua, por ejemplo, una que corresponda a un cauce superficial cuya asignación sea de 100 l/s, y otra, a un pozo profundo cuyo caudal teórico sea de 90 l/s, aplicando los factores de ajuste (0.6 para cauce superficial y 0.8 para pozo profundo), el caudal real captado en el cauce durante el día sería de 60 l/s, mientras que el caudal real captado en el pozo sería de 72 l/s, para un total de 132 l/s.

En consecuencia, el balance entre oferta y demanda es de:

$$132 - 168 = -36 \text{ l/s}$$

Esto indica que se requiere un desarrollo de aguas para la unidad productiva que puede ser la construcción de un embalse de regulación o de aprovechamiento de excedentes de agua. No menos importante es hacer gestión sobre la labor de riego para reducir el volumen de agua que se aplica en cada evento de riego.

Por ejemplo, si en lugar de 1500 m³/ha por riego, se reduce a 1200 m³/ha por riego, el módulo operativo bajaría a 1.34 l/s por ha, que multiplicado por 100 ha daría un total de 134 l/s de requerimiento en la fuente. De este modo, alcanzaría la oferta que es de 132 l/s.



## CONTENIDO

Introducción	85
Métodos de medición	86
Método volumétrico	86
Métodos de área - velocidad	87
Método del flotador	87
Método del molinete	89
Aforo en canales abiertos	
Aforador RBC	
Funcionamiento del aforador RBC	91
Selección del sitio para la construcción o instalación del aforador RBC	91
Diseño y calibración del aforador RBC	92
Interpretación de los resultados de la calibración del aforador RBC	96
Acondicionamiento del sitio para la construcción o instalación del aforador RBC	96
Mantenimiento del aforador RBC	96
Vertederos de cresta afilada	97
Canaleta sin cuello	97
Caudal en una canaleta sin cuello	99
Selección del sitio para la instalación o construcción de la canaleta sin cuello	100
Diseño de una canaleta sin cuello	
Orificio sumergido	
Sistema de aforo con registro continuo en canales abiertos	103
Medidor Doppler ultrasónico para aforo en canales abiertos	
Aforo en tuberías	106
Medidor de hélice para tuberías	106
Método de orificio y piezómetro	107
Método de las coordenadas	109
Medición con sensor electromagnético en tuberías	109
Medidor de ultrasonido	110
Medidor Doppler ultrasónico	110
	1



## **INTRODUCCIÓN**

En el cultivo de la caña de azúcar, el riego es una labor costosa que representa entre el 30% y el 60% del costo total de producción. Entre los insumos de riego, el agua es el más costoso, puesto que se debe extraer de pozos profundos o captar por gravedad mediante bocatomas, o por bombeo desde un cauce, para luego ser almacenada y conducida hasta la cabecera de los campos por canales abiertos o tuberías a presión y estructuras hidráulicas complementarias.

En los períodos de sequía, los agricultores, por lo general, no disponen de la cantidad de agua suficiente para atender las necesidades de riego. Una forma de enfrentar estos períodos y conservar el recurso hídrico es mejorar la eficiencia en el uso del agua, para lo cual es indispensable medir el caudal disponible en los sitios de captación, los canales de conducción y en los propios campos de cultivo.

En riego, la medición es el conjunto de procedimientos o métodos utilizados para estimar y registrar la cantidad de agua utilizada en un predio por un usuario en un determinado período de tiempo. El objetivo de la medición es permitir que tanto el usuario como las entidades reguladoras del recurso conozcan el volumen de agua (m³) que ha sido utilizado. Este volumen se calcula multiplicando el caudal de agua medido por el tiempo durante el cual es usado.

En este capítulo, se explican los métodos de medición o aforo de agua de riego, con sus respectivas definiciones y características hidráulicas más relevantes. En este contexto, aunque se relaciona un amplio número de estructuras, el detalle sobre los procedimientos de diseño, calibración y uso se presenta solo para aquellas que se consideran más apropiadas en las condiciones del sector agroindustrial de la caña de azúcar localizada en el valle geográfico del río Cauca, Colombia.



Los métodos de medición de caudal de agua para riego pueden ser directos o indirectos. A continuación, se describen los principios en los que se basan los métodos más comunes:

#### MÉTODO VOLUMÉTRICO

Consiste en medir directamente el volumen de agua (V) en un recipiente y el tiempo (T) con un cronómetro. El caudal resulta de dividir el volumen captado entre el tiempo que transcurre en la recolección de dicho volumen.

$$Q = \frac{V}{T}$$

#### Donde:

• Q: caudal en l/s

• V: volumen en litros (I)

• T: tiempo en segundos (s)

De acuerdo con el *Soil Conservation Service* (Servicio de Conservación de Suelos [de los Estados Unidos]) (1973), el método volumétrico es sencillo, demanda poco equipo y muestra resultados confiables; no obstante, su uso está restringido al riego por surcos. En un cronómetro común el tiempo puede ser medido con intervalos de 0.2 segundos; por tanto, para llenar un recipiente y obtener el caudal con un margen de error del 1%, se requieren 20 s, 10 s para un error del 2%, o 4 s para un error del 5%.

En surcos regados por medio de boquetes construidos en el canal regador, se debe hacer una excavación para colocar un recipiente con capacidad de 10 a 12 litros, tal como se muestra en la Figura 4.1, teniendo presente que, para asegurar la captación total del agua, la boca del recipiente debe quedar en contacto con el fondo del surco. Una vez realizada esta operación, se registra el tiempo en segundos que el balde tarda en llenarse y el volumen en litros se divide por este tiempo para obtener el caudal (I/s).

En surcos que reciben agua desde politubulares o tubería de PVC con compuertas, la medición se hace directamente en el punto de salida, sin necesidad de hacer excavación (se debe tener cuidado de que la boca del recipiente quede en forma horizontal), y el operario registra el tiempo en segundos que tarda en llenar un balde calibrado previamente. Para una medición con un margen de error del 5% se requiere, por lo menos, un tiempo de registro de 4 segundos. La medición se realiza tres veces en una compuerta, repitiendo el procedimiento en dos compuertas más. Si el caudal que sale por la compuerta es mayor a 3 l/s, se puede utilizar una bolsa plástica para recibir el agua y un recipiente con graduación en litros. El procedimiento consiste en medir el volumen de agua recogido en la bolsa en un tiempo determinado, por ejemplo, 10 segundos. Para más detalles se sugiere consultar la "Guía metodológica" sobre este tema, publicada por Cenicaña (Cruz, 2014).

# Figura 4.1 Excavación e instalación de recipiente graduado para medición volumétrica del caudal en surcos que captan agua por aberturas en el canal regador.

#### MÉTODOS DE ÁREA - VELOCIDAD

Estos métodos miden el caudal de manera indirecta, utilizando el principio de continuidad:

$$Q = A * v$$

Donde:

- Q: caudal en m<sup>3</sup>/s
- A: área de la sección transversal del flujo en m<sup>2</sup>
- v: velocidad del agua en m/s

Para medir la velocidad de agua, se pueden utilizar los siguientes métodos:

#### Método del flotador

Según el Ideam (1999), este método consiste en medir la velocidad del agua en la superficie, utilizando un flotador que puede ser un corcho, una bola de ping-pong o un trozo pequeño de madera. A la velocidad de viaje del flotador, se le aplica un factor de corrección que, de acuerdo con la investigación realizada por Cenicaña (Cruz, 2014), es de 0.85 para los canales en cultivos de caña de la zona azucarera de Colombia, con el fin de obtener el promedio de la velocidad del agua en la sección transversal, el cual se multiplica por el área de la sección transversal del canal.



#### PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN CON FLOTADOR

- 1. Seleccione un tramo recto del canal.
- 2. Mida una distancia de 10 m en dicho tramo y coloque estacas guías a los lados para delimitarla.
- **3.** Coloque el flotador y determine el promedio de tres mediciones del tiempo que tarda en recorrer la distancia de 10 m.
- **4.** Calcule la velocidad superficial del agua  $(v_s)$ :

$$v_s = 10 \text{ m/tiempo (s)}$$

- **5.** Determine la velocidad promedio del agua en el canal (*v*) multiplicando la velocidad superficial por 0.85.
- 6. Calcule el área transversal del canal, teniendo en cuenta la forma: trapezoidal, rectangular, triangular o irregular (Figura 4.2).

Para calcular el área de un canal abierto de sección irregular, se coloca un travesaño en la boca del canal y sobre él se mide el ancho del espejo del agua (B). Este valor se divide en cinco partes; por ejemplo, si B mide 2 m, cada parte tendrá un valor de 0.4 m, que se representa como Z (Figura 4.2). Estas cinco secciones se marcan en el travesaño y, en cada una de ellas, con excepción de los extremos, se mide la profundidad del agua o tirante (h). El área es:

$$Area = \left(\frac{h_1 + h_4}{2} + h_2 + h_3\right) * Z$$

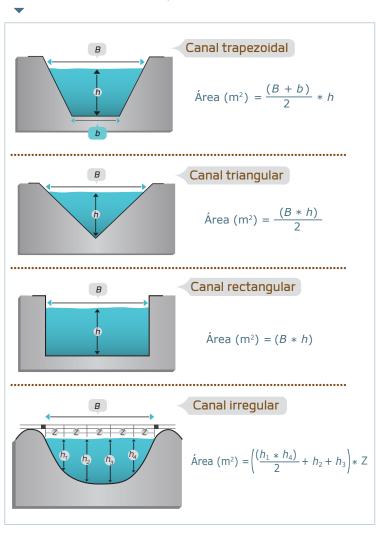
Finalmente, se calcula el caudal:

$$O = A * v$$

#### Donde:

- Q: caudal (m $^3$ /s).
- A: área de la sección tranversal del flujo (m²).
- v: velocidad promedio del agua (m/s).

Figura 4.2
Esquemas y fórmulas para calcular las áreas de sección transversal de diferentes tipos de canales abiertos.



#### Método del molinete

En este método, la velocidad del agua se obtiene con un molinete o un micromolinete, los cuales miden la velocidad en un punto dado de la masa de agua (Figura 4.3). El rango de operación del molinete es de 0.03 m/s a 10 m/s, mientras que el del micromolinete es de 0.03 m/s a 6 m/s.

El molinete es, básicamente, una hélice con aspas, propela o un conjunto de copas que rotan sobre un eje horizontal o vertical, al ser impulsadas por el flujo de agua. La propela va engranada a un contador de revoluciones que mide la velocidad de flujo, la cual es multiplicada por el área de la sección transversal del canal de conducción para obtener el volumen del caudal. Aunque anteriormente este dispositivo solo era utilizado en corrientes naturales o en canales abiertos e irregulares, en los que no era posible el aforo directo de agua, en la actualidad, se cuenta con molinetes y micromolinetes digitales de alta precisión para aforar todo tipo de canales y calibrar estructuras como vertederos o canaletas. Los molinetes de propela son excelentes para un trabajo rápido y seguro, siempre y cuando estén calibrados y se sometan al mantenimiento que requieren.

Los molinetes y micromolinetes pueden ser de rotores de eje vertical u horizontal. Los de eje vertical, también conocidos como tipo Gurley, operan a menores velocidades que los de eje horizontal; los cojinetes están bien protegidos de daños ocasionados por residuos en el agua y utilizan un rotor único que sirve para toda la gama de velocidades del agua. Los molinetes de eje horizontal, también conocidos como universales o tipo Ott, tienen un rotor que perturba menos el flujo de agua, en comparación con los de eje vertical, y brinda menor probabilidad de obstrucción a causa de los desechos que arrastran las corrientes.

En canales de riego, el molinete debe ser instalado sobre una regla graduada con el fin de conocer la profundidad del punto de medición. Dado que el molinete mide la velocidad en un punto, para obtener la velocidad media (v), la medición se debe hacer en el centro del canal a 0.2 y 0.8 veces la profundidad a partir de la superficie del agua. Para hallar el área de la sección transversal A, se puede utilizar el procedimiento descrito antes en el método del flotador. Finalmente, el caudal se calcula como:

O = A \* v

A. Detalle de molinete.
B. Micromolinete de hélice para medir la velocidad del agua en canales abiertos.





### AFORO EN CANALES

### **ABIERTOS**

Para la medición de caudal en canales abiertos, también se utilizan algunas estructuras conocidas como aforadores, las cuales difieren tanto en precisión como en costos. Las más comunes son los vertederos, las canaletas y los orificios sumergidos.

#### AFORADOR RBC

El aforador RBC es un vertedero de cresta larga que se construye como resalto en un canal abierto, con el objetivo de producir un flujo crítico, definido como el flujo en el cual la energía específica presenta el valor mínimo para un caudal determinado y un valor único de la profundidad de flujo. Este aforador tiene una rampa en la entrada (Figura 4.4) para facilitar el flujo de los sedimentos presentes en el agua.

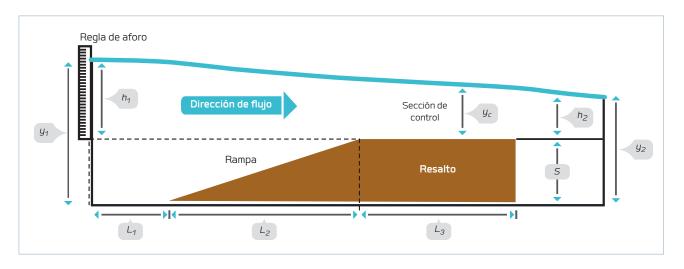
Torres y Cruz (1993) encontraron que el aforador RBC tiene ventajas sobre otras estructuras como la canaleta sin cuello o la canaleta Parshall, debido a la facilidad de construcción e instalación, economía y precisión en los aforos.

La estructura de aforo RBC se coloca en el fondo del canal y, para su construcción, es necesario conocer la altura de la cresta (S), la distancia desde la mira o regla de aforo hasta donde comienza la rampa  $(L_1)$ , la longitud de la proyección horizontal de la rampa  $(L_2)$  y la longitud de la cresta  $(L_3)$ .

La definición de la altura del vertedero debe ser lo más precisa posible porque de ella depende el nivel de agua en el canal aguas arriba de la estructura. Esta altura debe ser suficiente para provocar una caída hidráulica sobre la cresta y un salto hidráulico con una altura adecuada, tan pronto como el agua pasa sobre el aforador. Una altura excesiva provoca acumulación de sedimentos y aumento en el costo de la estructura.

La regla de aforo debe ser colocada a una distancia  $L_1$  mayor o igual a 1.2 veces la altura máxima del agua, medida por encima de la cresta  $(h_1)$  en el canal de aproximación; en general, se recomienda que esta distancia  $L_1$  sea igual a tres veces  $h_1$ .





Adicionalmente, se debe dejar un borde libre por encima del nivel máximo de agua en el canal para evitar desbordamientos. Se sugiere que este borde libre corresponda a 0.2 veces el tirante o profundidad máxima del agua en el canal.

La rampa de entrada del vertedero debe tener una pendiente de 3:1 (tres unidades de longitud horizontal por cada unidad de longitud vertical). Esto significa que la longitud de la proyección horizontal de la rampa  $(L_2)$  debe ser igual a tres veces la altura de la cresta (S). Finalmente, la longitud de la cresta  $(L_3)$  debe ser mayor a 1.5 veces la altura máxima del agua medida por encima de la cresta  $(h_1)$ .

Con el fin de facilitar la remoción de sedimentos y el vaciado del canal, se puede instalar en la base del aforador y a lo largo de la estructura, un par de tubos de PVC con diámetros de 2.5 cm o 5.1 cm, dependiendo del tamaño del aforador.

#### Funcionamiento del aforador RBC

Las estructuras de aforo ocasionan contracciones en la sección transversal de los canales, lo que obliga a incrementar la velocidad del agua hasta un nivel crítico. Estas tienen una relación directa con el caudal transportado por el canal en ese momento, lo que permite establecer curvas y tablas de aforo de caudal Q en función del nivel de agua  $(h_1)$ , el tamaño y el tipo de estructura.

El aforador RBC es una estructura hidráulicamente determinada que permite simular en forma matemática su funcionamiento y generar una nueva curva o tabla de calibración, en caso de que se presenten cambios en las dimensiones de la estructura durante su construcción.



Aforador RBC para medición de agua en surco.

## Selección del sitio para la construcción o instalación del aforador RBC

Las estructuras de aforo en canales abiertos deben ser instaladas en tramos rectos donde no existan entradas ni derivaciones de agua cercanas. El canal aguas arriba de la estructura de aforo debe ser recto en una distancia mayor a diez veces  $h_1$ , con el fin de obtener mediciones razonablemente precisas (3% de error permisible).

Se requiere que el flujo de agua en el canal sea uniforme, es decir, sin turbulencia ni remolinos u ondas en la superficie; esto significa que el espejo de agua debe ser una superficie plana y uniforme.

Para obtener mediciones precisas en canales abiertos, el número de Froude

(Fr) no debe exceder el valor 0.5. Este número es un parámetro adimensional que determina el tipo o grado de turbulencia de una corriente, y se define como la relación entre las fuerzas inercial y gravitacional del flujo de agua. Puede ser usado para distinguir entre flujos subcrítico, crítico y supercrítico. El flujo crítico ocurre cuando Fr=1, o sea, que la fuerza inercial es igual a la fuerza gravitacional. Un Fr<1 significa flujo subcrítico, el cual es laminar, donde cada partícula de agua fluye en dirección paralela con velocidad uniforme. Un Fr>1 significa flujo supercrítico, que es turbulento.

El número de Froude (Fr) para el flujo de agua en un canal abierto se calcula así:

$$Fr = \frac{V}{\left(\frac{gA}{B}\right)^{1/2}}$$

#### Donde:

- v: velocidad del agua en el canal (m/s)
- g: constante gravitacional  $(q = 9.81 \text{ m/s}^2)$
- A: área de la sección transversal del flujo (m²)
- B: ancho del espejo de agua (m)

En canales con pendiente muy baja, se puede producir un represamiento aguas arriba cuando se instalan estructuras de aforo, lo que constituye un factor limitante. Sin embargo, el aforador RBC tolera bastante bien las condiciones de sumersión o ahogamiento, debido a que presenta bajas pérdidas de carga. La tasa de ahogamiento se define como la relación entre las alturas del agua en el canal aguas abajo del aforador  $(y_2)$  y en la estación de medición ubicada aguas arriba ( $y_1$ ). Cada estructura de aforo tiene un valor límite para la tasa de ahogamiento o sumersión, denominado límite modular, el cual equivale a la pérdida de carga total que permite la estructura. El límite modular se define como la tasa de ahogamiento o sumersión  $(y_2/y_1)$  por la



Instalación de la canaleta RBC para surcos.

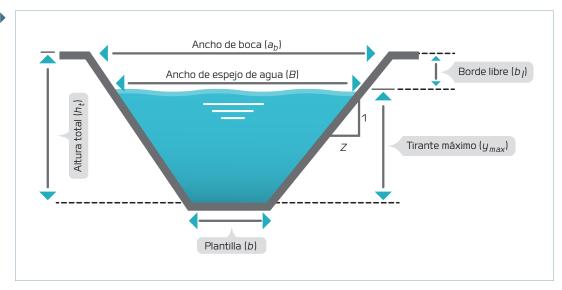
cual el caudal real se reduce en 1%, a causa del incremento en el nivel del agua inmediatamente después de la estructura. En el caso del vertedero RBC, el límite modular es de 0.95.

#### Diseño y calibración del aforador RBC

Una vez seleccionado el sitio para la construcción o instalación de un aforador RBC, se deben conocer los caudales de agua máximo y mínimo que transporta el canal. Para el diseño, se miden las dimensiones en metros de la sección transversal del canal: ancho de la plantilla (b), ancho de la boca  $(a_b)$ , altura total  $(h_t)$ , tirante máximo  $(y_{máx})$  y borde libre  $(b_l)$  para el caudal máximo. El talud Z:1 se calcula como la relación entre la proyección horizontal y la proyección vertical de la pared del canal (Figura 4.5).

En los campos cultivados con caña de azúcar, es común encontrar dos o tres secciones típicas de canales, para las cuales se sugieren las alturas de cresta que aparecen en el Cuadro 4.1. Esto permite la construcción de estructuras de aforo fijas o portátiles de dimensiones estandarizadas, con su correspondiente tabla de calibración (Cuadro 4.2).

Figura 4.5 Mediciones en la sección transversal de un canal necesarias para diseñar y calibrar el aforador RBC.



Cuadro 4.1
Secciones típicas de canales y alturas de cresta sugeridas para el aforador RBC, en campos cultivados con caña de azúcar en el valle geográfico del río Cauca, Colombia.

CANAL	CAUDAL (I/s)	PLANTILLA ( <i>b</i> ) (m)	TIRANTE (y) (m)	TALUD <i>Z</i> :1	ALTURA DE CRESTA (S) (m)
Surco	< 10	0.05 - 0.30	0.10 -0.20	0.5:1	0.05 - 0.10
Terciario	100-300	0.40 - 0.80	0.40 -1.00	1:1	0.20 - 0.25
Secundario	300-600	0.60 - 0.80	0.50 -1.00	1:1	0.25 - 0.35
Primario	> 600	1.00 - 3.00	0.75 -3.00	1:1	0.35 - 0.50

Z: Relación entre la proyección horizontal y la proyección vertical del talud del canal.

Tabla de
calibración del
aforador RBC
para secciones típicas
de canales
en campos
cultivados con
caña de azúcar en el valle
geográfico
del río Cauca,
Colombia.

SI	URCOS	CANA	L TERCIARIO		CAN	AL SECI	UNDARIO	CANA	L PRIMARIO
<i>b</i> =	0.05 m	<i>b</i> =	0.40 m	1	b =	0.60	m	<i>b</i> =	1.20 m
$b_{\rm C} =$	0.10 m	$b_{c} =$	0.80 m	1	$b_c =$	1.20	m	$b_{c} =$	2.00 m
Z =	0.5	Z =	1.00		z =	1.00		Z =	1.00
S =	0.05 m	S =	0.20 m		S =	0.30	m	S =	0.40 m
L <sub>1</sub> =	0.30 m	$L_1 =$	1.00 m		L <sub>1</sub> =	1.00		L <sub>1</sub> =	1.50 m
$L_2 =$	0.15 m	$L_2 =$	0.60 m		$L_2 =$			$L_2 =$	1.20 m
	0.20 m		1.20 m		$L_2 = L_3 = 0$	1.30		$L_2 = L_3 =$	2.00 m
$L_3 =$	0.20 111	<i>L</i> <sub>3</sub> =	1.20 111	,	L3 -	1.50	111	L3 -	2.00 111
$h_1$	Q	$h_1$	Q		h		Q	$h_1$	Q
(cm)	(I/s)	(cm)			(cm		(I/s)	(cm)	(I/s)
2.0	0.5	15				20	212	20	327
2.2	0.6	16				21	230	21	355
2.4	0.7	17	7 116			22	249	22	383
2.6	0.8	18	3 128			23	269	23	412
2.8	0.9	19	9 141			24	289	24	443
3.0	1.0	20	154			25	311	25	473
3.2	1.1	2:	L 168			26	333	26	506
3.4	1.2	22				27	355	27	539
3.6	1.4	23				28	379	28	573
3.8	1.5	24				29	403	29	608
4.0	1.6	25				30	428	30	643
4.2	1.8	26				31	454	31	680
4.4	1.9	27				32	480	32	718
4.6	2.1	28				33	507	33	757
4.8	2.2	29				34	535	34	796
5.0	2.4	30				35	563	35	837
5.2	2.6	3:				36	593	36	878
5.4	2.8	32				37	623	37	921
5.6	2.9	33				38	653	38	964
5.8	3.1	34				39	685	39	1009
6.0	3.3	35				40	718	40	1054
6.2	3.5	36	5 453			41	751	41	1100
6.4	3.8	37	7 477			42	785	42	1147
6.6	4.0	38	3 502			43	820	43	1196
6.8	4.2	39	528			44	856	44	1245
7.0	4.4	40	554			45	892	45	1295
7.2	4.7					46	929	46	1346
7.4	4.9					47	967	47	1398
7.6	5.1					48	1006	48	1451
7.8	5.4					49	1046	49	1505
8.0	5.7					50	1086	50	1560
8.2	5.9							51	1617
8.4	6.2							52	1674
8.6	6.5							53	1731
8.8	6.8							54	1731
9.0	7.1							55	1850
9.2	7.4							56	1911
9.4	7.7							57	1972
9.6	8.0							58	2036
9.8	8.3							59	2100
10.0	8.7							60	2165

 $b_{\it c}$ : ancho de la cresta medido transversal al flujo.

 $h_1$ : lectura de mira vertical.

#### PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO Y CALIBRACIÓN DEL AFORADOR RBC

Para el diseño y la calibración de aforadores en canales con diferentes dimensiones, actualmente, se dispone del *software* libre denominado *WinFlume*, del Servicio de Investigación Agrícola de Estados Unidos y el Instituto Internacional para la Recuperación y Mejoramiento de Tierras de Holanda (ARS e ILRI, respectivamente, por sus siglas en inglés), el cual se puede obtener en el sitio web: http://www.usbr.gov/tsc/hydlab/winflume/

Una vez descargado el *software* en el computador, este es el procedimiento para el diseño del aforador RBC:

- 1. Se abre el programa y se activa el ícono de crear un nuevo aforador (Create a new flume). Luego se activa el asistente Flume wizard, que es una guía para el diseño. Las instrucciones del asistente son las siguientes:
  - Confirmar el nombre del usuario.
  - Seleccionar las unidades de medida del sistema métrico.
  - Escoger el tipo de cresta (se selecciona la estacionaria) y el material de la estructura del aforador RBC.
  - Determinar las dimensiones del perfil del fondo de la estructura: profundidad del canal, altura del aforador, longitud L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub> y L<sub>3</sub>, y pendiente de la caída del aforador después de la cresta. En la zona azucarera de Colombia, la caída más común es la vertical.
  - Definir las dimensiones de la sección transversal del canal de aproximación, de la sección de control sobre la cresta y del canal aguas abajo del aforador.
  - Seleccionar el rango de descarga (caudales mínimo y máximo), los niveles del flujo aguas abajo del aforador, el método de diseño del canal (ecuación de Manning) y el material de construcción.

- Seleccionar el dispositivo de medida; por ejemplo, una regla graduada pintada sobre el talud del canal de aproximación.
- Definir los requerimientos de borde libre en el canal, expresados como distancia (m) o como porcentaje de la profundidad o tirante del canal aguas arriba (10% a 20%).
- Guardar en la memoria del computador el diseño del aforador, y verificar si es aceptable y cumple con los criterios que aparecen a la derecha de la pantalla: número de Froude, borde libre y protección de sumersión o ahogamiento. El valor del factor de protección del ahogamiento corresponde a la distancia vertical entre el nivel de agua aceptable en el canal aguas abajo del vertedero y el nivel de agua real del canal aguas abajo; funciona como seguro contra posibles errores en la estimación de las condiciones aguas abajo en el sitio. Un diseño con más protección a la sumersión (más pérdida de carga) permite estimar algún error en el nivel del canal de aguas abajo, sin causar ahogamiento en el aforador.
- 2. Una vez ejecutadas las instrucciones del asistente *Flume wizard*, se analiza el diseño del aforador utilizando los siguientes menús:
  - Menú de diseño:
    - Revisar el diseño para asegurar el cumplimiento de los criterios.
    - Evaluar diseños alternativos, derivados del diseño inicial.
    - Revisar las sugerencias de selección del sitio (*Site selection tips*).
  - Menú de reportes y gráficos:
    - Tabla de especificaciones del aforador.
    - Reporte de datos del aforador.
    - Tabla de calibración de la mira de lectura del caudal.

#### Interpretación de los resultados de la calibración del aforador RBC

Los resultados del programa se interpretan según la descripción que aparece como ayuda en el Cuadro 4.3. Los valores de la columna  $h_z$  son las alturas que se leen en la regla del aforador instalada sobre el talud del canal; cada una de estas alturas hace referencia a un caudal Q tomado de la cuarta columna. Las demás columnas hacen referencia a variables hidráulicas propias de la estructura del aforador.

#### Acondicionamiento del sitio para la construcción o instalación del aforador RBC

Cuando los canales de conducción de agua son construidos sobre tierra, dependiendo de su tamaño, es fundamental revestirlos en un tramo determinado. Para caudales menores a 600 l/s, se recomienda revestirlos al menos 10 m;

mientras que para caudales mayores a 600 l/s, se requiere un revestimiento de 15 m, como mínimo.

En canales revestidos, es necesario fundir el vertedero RBC con la rampa en el fondo del canal.

Cuando el aforador RBC se instala de manera permanente, se puede construir en diversos materiales como ladrillo, bloques de concreto o concreto fundido *in situ* (Figura 4.6). En instalaciones temporales o portátiles, las opciones son fibra de vidrio, resina de plástico o aluminio.

Los costos de construcción del aforador RBC son significativamente más bajos que los de estructuras más complejas, como las canaletas Parshall y las canaletas sin cuello. En canales pequeños, muy comunes en el cultivo de la caña de azúcar, los costos pueden ser solamente de 10% a 20% del costo de las estructuras de aforo tradicionales y, en el caso de canales más grandes, el costo de referencia puede ser del 50%.

Figura 4.6 Aforador RBC permanente construido en concreto en un canal de riego primario.



#### Mantenimiento del aforador RBC

Las estructuras de aforo, al igual que los canales, requieren mantenimiento periódico con el fin de remover los sedimentos, las malezas acuáticas y las gramíneas que crecen en el talud y en la berma del canal, las cuales afectan la relación entre el caudal y la geometría, alterando la precisión de las mediciones. Estos mantenimientos deben ser efectuados antes de la lectura de la reglilla de aforo.

Cuadro 4.3	•
Ayuda para	
la interpre-	
tación de los	
resultados del	
programa de	
calibración del	
aforador RBC.	

h <sub>z</sub>	<i>h<sub>1</sub></i>	У <sub>с</sub>	<i>Q</i>	v <sub>1</sub>	ν <sub>c</sub>	H <sub>loss</sub>
(m)	(m)	(m)	(I/s)	(m/s)	(m/s)	(m)
Lectura del nivel de agua sobre el talud del canal.	Lectura del nivel de agua sobre la vertical.	Tirante crítico sobre el resalto.	Caudal en el canal.	Velocidad del agua en la regla de medida.	Velocidad critica del agua sobre el resalto.	Pérdidas de energía debidas al aforador.

Fuente: Wahl et al. (2014).

#### VERTEDEROS DE CRESTA AFILADA

Los vertederos de cresta afilada son estructuras de aforo fabricadas en lámina delgada, con una abertura en la parte superior, cuyo espesor es menor que 2 mm (Figura 4.7). La abertura puede ser rectangular, triangular o trapezoidal. En general, este tipo de vertederos se recomienda para casos donde se requieren mediciones de alta precisión, por ejemplo, en laboratorios de hidráulica y en las industrias.

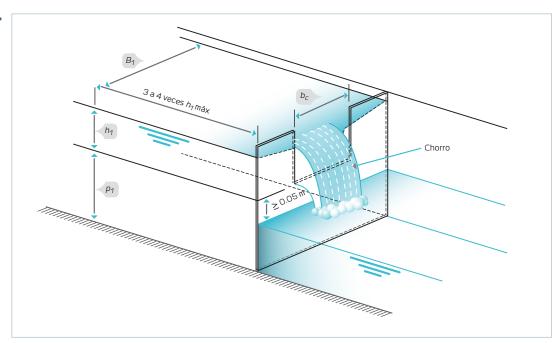
La pérdida de carga requerida por un vertedero de cresta afilada excede en más de 5 cm la carga aguas arriba respecto al nivel de la cresta. Esta es una de las principales limitaciones para el uso de estos vertederos en los sistemas de riego localizados en la zona plana del valle geográfico del río Cauca. Además, no son apropiados en corrientes que arrastran sedimentos, los cuales se depositan en el cauce de aproximación y limitan las condiciones para un aforo preciso. En el Anexo B.3 se presentan las características de diseño y calibración de los vertederos de cresta afilada.

#### CANALETA SIN CUELLO

Es una estructura tipo "canaleta de profundidad crítica", caracterizada por presentar un estrangulamiento de la corriente de agua en un canal abierto, lo que produce una caída en la superficie de agua suficiente para que ocurra flujo crítico. Consiste en una sección de entrada convergente, una garganta que corresponde a un solo punto y una sección de salida divergente (Figura 4.8). Su fondo es horizontal, lo que representa una ventaja respecto a la canaleta tipo Parshall, por su construcción fácil y económica. La canaleta sin cuello es adecuada para los canales abiertos que se construyen en el valle geográfico del río Cauca, debido a su geometría sencilla, facilidad de construcción y adaptación en aguas con sedimentos.

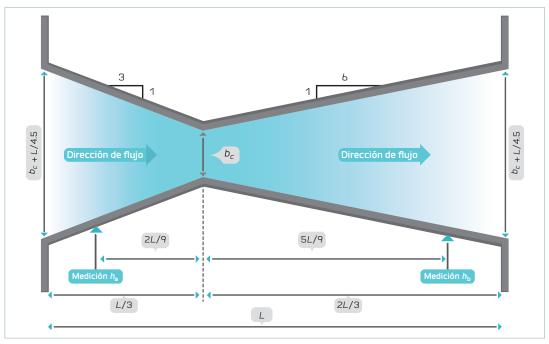
Kraats y Mahajan (1982), investigadores de la FAO, recomiendan el uso de la canaleta sin cuello en condición de flujo libre, el cual significa que el caudal sobre el punto más estrecho de la canaleta es independiente de la variación en la carga hidráulica aguas abajo; por tanto, el

Figura 4.7 Dibujo en perspectiva del vertedero de cresta afilada de sección transversal rectangular.



Fuente: Adaptado de Bos (1989).

Figura 4.8 Detalle de las proporciones de las medidas de la canaleta sin cuello.



Fuente: Adaptado de Kraats y Mahajan (1982).

caudal Q en este tipo de canaleta se puede determinar mediante la ecuación:

$$Q = C * h_a^n$$

#### Donde:

- Q: caudal en m<sup>3</sup>/s.
- C: coeficiente de flujo libre.
- h<sub>a</sub>: tirante o profundidad aguas arriba (m), medido a una distancia igual a 2 L/9 a partir del cuello, siendo L la longitud de la canaleta.

El coeficiente de flujo libre *C* se calcula como:

$$C = K * b_c^{1.025}$$

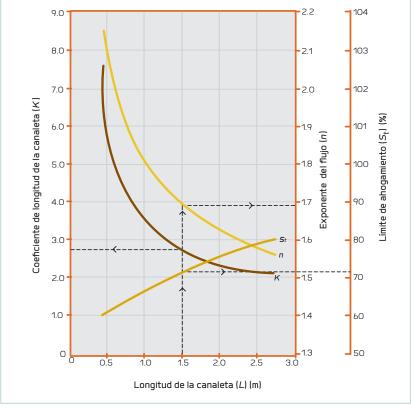
#### Donde:

- K: coeficiente de longitud de la canaleta sin cuello, el cual se determina basándose en la Figura 4.9, en función de la longitud de la canaleta.
- $b_c$ : ancho del cuello de la canaleta (m).

El exponente de la ecuación n se obtiene también a partir de la Figura 4.9, en función de la longitud L (en metros) de la canaleta.

Para obtener mediciones precisas de caudal, se recomienda que la relación entre el tirante de agua  $(h_a)$ , medido a la distancia de 2 L/9 aguas arriba del cuello de la estructura, y la longitud (L) de la canaleta no supere el valor de 0.4.

Valores de K, n y S<sub>t</sub> en función de L (longitud) para determinar el caudal medido en una canaleta sin cuello.



Fuente: Adaptado de Kraatz y Mahajan (1982).

#### Caudal en una canaleta sin cuello

#### **EJEMPLO**

#### Cálculo del caudal en una canaleta sin cuello

Una canaleta sin cuello construida en un canal abierto tiene una longitud L de 1.5 m y un ancho  $b_c$  en el cuello de 0.4 m. Se quiere conocer el caudal de agua cuando la carga hidráulica  $h_a$  es de 0.35 m:

1. Para calcular el caudal en la canaleta se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q = C * h_a^n$$

Donde el coeficiente de flujo libre *C* se puede calcular como:

$$C = K * b_c^{1.025}$$

En la Figura 4.9 se encuentra el coeficiente de longitud K = 2.75; por tanto,

$$C = 2.75 * 0.4^{1.025} = 1.08$$

2. Una vez obtenido el valor *C*, se procede a hallar el valor del exponente *n* de la fórmula de caudal, el cual se determina en la Figura 4.9, donde se encuentra que el valor de *n* es 1.69. Conocidos los valores de *C* y de *n*, es posible reemplazar en la fórmula de caudal de la canaleta sin cuello, así:

$$Q = C * h_a^n$$

$$Q = 1.08 * 0.35^{1.69}$$

$$Q = 0.182 \text{ m}^3/\text{s} (182 \text{ l/s})$$

#### Selección del sitio para la instalación o construcción de la canaleta sin cuello

La canaleta sin cuello se debe instalar o construir en un tramo recto del canal abierto con baja pendiente, donde no existan entradas ni derivaciones de agua cercanas y el flujo sea uniforme, es decir, que el agua no presente turbulencia o remolinos ni ondas en la superficie.

Después de seleccionar el sitio para construir la canaleta sin cuello, es necesario conocer los siguientes parámetros de diseño:

- Caudal máximo a medir.
- Profundidad del agua o tirante del canal correspondiente al caudal máximo.
- Pérdida de carga permisible en la canaleta.

Para propósitos de diseño, la pérdida de carga es considerada como el cambio en el nivel de agua entre la entrada y la salida de la canaleta. La profundidad o tirante aguas abajo de la estructura prácticamente no cambia después de la construcción de la canaleta, pero aguas arriba sí eleva el nivel de agua en un valor equivalente a la pérdida de carga. El incremento permisible de la profundidad de flujo aguas arriba está limitado por la altura total del canal menos el borde libre. Esta condición puede requerir un incremento en el tamaño de la canaleta, con el fin de reducir el nivel de agua hasta un valor aceptable.

Otras condiciones que se deben tener en cuenta son las siguientes:

- 1. El piso de la canaleta debe quedar a nivel en el canal, tanto en dirección longitudinal como transversal; además, debe ser alineada con el eje del tramo recto del canal.
- **2.** El ancho del cuello  $(b_c)$  es la dimensión que requiere mayor atención durante la construcción. En caso de un error de construcción en este parámetro, se debe recalibrar la relación caudal-carga. Si es en concreto, se sugiere empotrar un ángulo de metal en la sección transversal del cuello.

- 3. Según los desarrolladores de esta canaleta, no es necesaria una estructura de transición entre ella y el canal abierto. Lo importante es que la relación entre el tirante aguas arriba y la longitud de la canaleta (ha:L) no supere el valor 0.4.
- 4. Para la instalación de la mira o regla de medición de la carga hidráulica aguas arriba, se recomienda una distancia de 2 L/9 aguas arriba del cuello. El valor cero (0) de la mira debe corresponder al nivel del fondo de la canaleta.
- 5. Para asegurar la condición de flujo libre, la relación entre el tirante en la salida  $(h_b)$  y en la entrada  $(h_a)$ , o sea,  $h_b$ : $h_a$ , no debe exceder un límite, denominado ahogamiento o sumersión  $(S_t)$ , el cual se puede encontrar utilizando la Figura 4.9.
- 6. Finalmente, el procedimiento para la instalación de la canaleta sin cuello en condición de flujo libre se resume así:
  - Determine el caudal máximo a me $dir (m^3/s)$ .
  - En el sitio seleccionado para instalar la canaleta, localice la marca más alta del agua en el canal y determine el tirante máximo permisible (m).
  - Calcule el tirante (en metros) que corresponde al caudal máximo usando la siguiente ecuación:

$$Q = C * h_a^n$$

Despejando  $h_a$ , se tiene:

$$h_a = (Q/C)^{1/n}$$

• Localice el piso de la canaleta a una profundidad  $(h_b)$  no menor que el producto de  $h_a$  por el coeficiente de ahogamiento  $S_t$  ( $h_b > h_a * S_t$ ), por debajo de la marca de agua más alta en el canal.  $S_t$  se puede encontrar utilizando la Figura 4.9. El fondo de la canaleta sin cuello debe quedar localizado tan alto en el canal como lo permitan la pendiente, el contenido de sedimentos del agua y demás condiciones necesarias para asegurar que el flujo sea libre.

EJEMPLO

## Cálculo de la carga hidráulica en la entrada $(h_a)$ y la salida $(h_b)$ de una canaleta sin cuello

En un canal abierto se quiere instalar una canaleta sin cuello para que funcione a flujo libre. El caudal máximo a medir es  $Q=0.2~\rm m^3/s$ , la longitud de la canaleta  $L=1.5~\rm m$ , y el ancho del cuello  $b_c=0.4$  (Figura 4.10).

En primer lugar, se procede a calcular el valor de la carga  $h_a$ :

$$h_a = \left(\frac{Q}{C}\right)^{1/n}$$

$$C = K * b_c^{1.025}$$

En la Figura 4.9 se observa que para la longitud L=1.5 m, el coeficiente de longitud K es 2.75 y el exponente n de la ecuación de caudal es 1.69; por tanto:

$$C = 2.75 * 0.4^{1.025}, C = 1.08$$

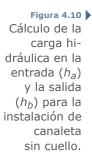
El valor de carga hidráulica en la entrada  $h_a$  para el caudal máximo es:

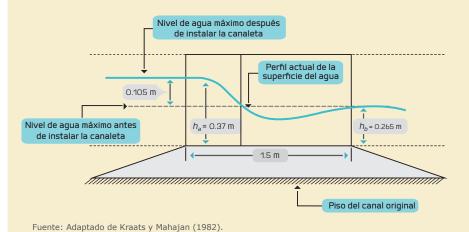
$$h_a = \left(\frac{0.2}{1.08}\right)^{1/1.69} = 0.37 \text{ m}$$

El coeficiente de ahogamiento  $S_t$  también se determina a partir de la Figura 4.9, en función de la longitud L de la canaleta, en este caso  $S_t = 71.7\%$ . Teniendo en cuenta que  $S_t = h_b / h_a$ :

$$h_b = S_t * h_a = 0.717 * 0.37 = 0.265 \text{ m}$$

En consecuencia, el piso de la canaleta sin cuello debe quedar localizado a una profundidad no menor a 0.265 m por debajo del nivel de agua más alto en el canal.





#### Diseño de una canaleta sin cuello

#### **EJEMPLO**

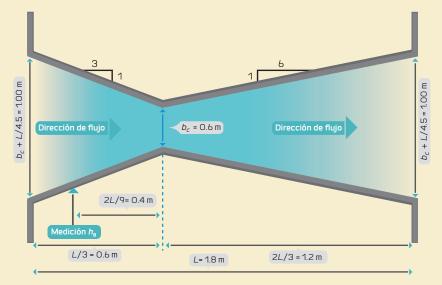
#### Diseño de una canaleta sin cuello

Se guieren determinar las dimensiones de una canaleta sin cuello para medir hasta un caudal máximo de  $0.35 \text{ m}^3/\text{s}$  (350 l/s), conducido en un canal abierto cuyo tirante máximo es de 30 cm y la pérdida de carga máxima permisible es de 12 cm:

- 1. Profundidad máxima de flujo aguas abajo: 30 cm.
- 2. Profundidad máxima de flujo aguas arriba: 30 cm + 12 cm = 42 cm.
- 3. Coeficiente de ahogamiento o sumersión ( $S_t$ ):
  - 30 cm / 42 cm = 0.71 (71%).
- 4. Partiendo de la Figura 4.9, se encuentra que para valores de tasa de ahogamiento mayores a 71%, la longitud de la canaleta sin cuello debe ser mayor a 1.47 m.
- 5. Para seleccionar el tamaño apropiado de la canaleta sin cuello se recomienda utilizar el Cuadro B.1.1 del Anexo B.1: se inicia con un tamaño tentativo de 40 cm x 180 cm (40 cm es el ancho de cuello y 180 cm es la longitud de la canaleta); se busca el caudal de 0.35 m<sup>3</sup>/s, o el que más se

- le aproxime (el caudal más cercano que aparece en el Cuadro B.1.1 es de 0.352 m<sup>3</sup>/s); se desplaza hacia la izquierda y se halla el valor de  $h_a$  (m), en este caso  $h_a = 0.54$  m (54 cm). Este valor es mayor que la profundidad máxima permisible del flujo aguas arriba (42 cm); por tanto, se debe aumentar el tamaño de la canaleta sin cuello para cumplir con las condiciones impuestas.
- 6. Regresando al Cuadro B.1.1 en el Anexo B.1, se tiene que al siquiente tamaño de canaleta (60 cm x 180 cm) para un caudal de 0.352 m<sup>3</sup>/s, le corresponde una profundidad aguas arriba de 0.42 m (42 cm), que es igual a la profundidad límite de 42 cm. Debido a ello, se selecciona este tamaño de canaleta.
- 7. Las demás dimensiones que componen el diseño de la canaleta sin cuello se determinan mediante las proporciones que aparecen en la Figura 4.8. Las dimensiones finales de la canaleta se observan en la Figura 4.11.

Figura 4.11 **Dimensiones** finales de la canaleta sin cuello, con base en el ejemplo de diseño propuesto.



Fuente: Adaptado de Kraats y Mahajan (1982).

#### **ORIFICIO SUMERGIDO**

Un orificio sumergido es una abertura de área definida en un tabique o compuerta, a través de la cual fluye el agua, y su superficie, aguas abajo, se eleva por encima de dicha abertura (Figura 4.12). Los orificios sumergidos se dividen en dos tipos:

- 1. Con dimensiones fijas.
- **2.** Construidos de tal forma que su altura sea modificable.

Los primeros se conocen como orificios sumergidos estándar y se emplean con mayor frecuencia. La abertura de un orificio de este tipo por lo general es rectangular, tiene los bordes afilados y el ancho es de dos a seis veces la altura.

Según el Soil Conservation Service (Servicio de Conservación de Suelos [de los Estados Unidos]) (1973), el método de aforo con el orificio sumergido se usa en canales con poca pendiente, donde las condiciones existentes no son adecuadas para el aforo con vertederos de flujo libre. El orificio sumergido presenta la misma desventaja que los vertederos de cresta afilada en lo relacionado con la acumulación de sedimentos, lo cual hace que la exactitud en el aforo sea menor y

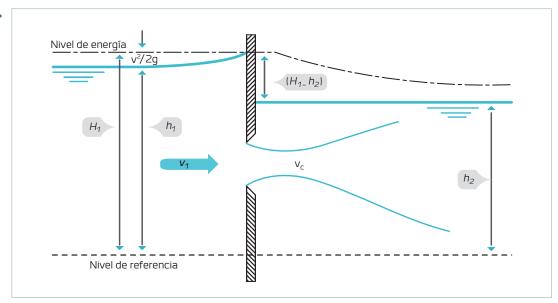
limita su uso como estructura de aforo en canales abiertos en el sector de la caña de azúcar en el valle geográfico del río Cauca. En el Anexo B.4 se presentan en detalle las características hidráulicas del orificio sumergido.

#### SISTEMA DE AFORO CON REGISTRO CONTINUO EN CANALES ABIERTOS

Este sistema de aforo está compuesto por una estructura hidráulica especialmente diseñada y calibrada, y un equipo electrónico que mide la carga hidráulica, la convierte en señal eléctrica y la almacena en un datalogger, el cual posee una interfaz que permite descargar la información y observar el caudal.

En el comercio, existen equipos que por su exactitud y precisión cumplen con los requerimientos de medición, pero por su alto costo y riesgos de pérdida o vandalismo, no son recomendables en las condiciones del sector azucarero. Por esta razón, Cenicaña y un grupo de ingenieros electrónicos de la Universidad del Valle, evaluaron tres tipos de sensores y desarrollaron un equipo comercial de registro de caudal continuo, útil para

Patrón de flujo a través de un orificio sumergido.



Fuente: Adaptado de Bos (1989).

los productores de caña de azúcar en Colombia, de bajo costo y mínimo riesgo de robo o daño, el cual se instala sobre el canal en el sitio donde se localiza la mira del aforador RBC o la canaleta sin cuello (Figura 4.13). El equipo consta de los siguientes componentes:

- Transductor/sensor de tipo ultrasonido.
- Datalogger para almacenar y descargar la información a una memoria USB.
- Batería de larga duración.
- Interfaz y pantalla LCD para visualizar el caudal, el volumen acumulado y otros parámetros.
- Componente de comunicación para envío de información de manera inalámbrica, para la implementación de telemetría con tecnologías comunes como GSM/GPRS, Wifi, ZigBee, RF o 6lowPan.

En el mercado existen diversos modelos de equipos para la medición de agua. De acuerdo con Links Ingeniería (2014), antes de adquirir estos equipos, se deben tener en cuenta los siguientes criterios:

Figura 4.13 Sistema de registro de caudal continuo para canales abiertos desarrollado por Cenicaña e ingenieros de la Universidad del Valle.









- Realizar una evaluación técnica de las características del equipo para validar si cumple con los requerimientos del sitio donde se utilizará.
- Efectuar la evaluación logística y administrativa para obtener la información sobre los procesos de mantenimiento.
- Debe existir una evaluación financiera sobre costos de adquisición y el retorno de la inversión con base en el cambio de facturación a volumen captado por parte de la autoridad ambiental (CVC, acuerdo 035).

La evaluación técnica debe responder a los siguientes aspectos:

- El sensor de medición debe ser adecuado para las condiciones del flujo.
- El sitio seleccionado para instalación debe cumplir con las condiciones del fabricante.
- Debe tener capacidad de resolución suficiente para los requerimientos del equipo.
- Es necesario que se garantice la gestión energética (celda solar, red eléctrica).
- Debe tener capacidad de expansión para más sensores.
- Dependiendo del equipo, se debe decidir el sistema de mantenimiento, bien sea con partes móviles o con sensor invasivo.

La evaluación logística y administrativa debe considerar:

- La forma de descargar los datos (manual o automática).
- La posibilidad de implementar telemetría.
- El cubrimiento de red celular (GSM/ GPRS).
- El tiempo requerido para evitar que el datalogger sobrescriba la información.
- La posibilidad de un software que permita calcular las variables requeridas y generar los reportes necesarios para analizar la información obtenida.

## MEDIDOR DOPPLER ULTRASÓNICO PARA AFORO EN CANALES ABIERTOS

Este tipo de medidor utiliza un sensor para la medición de agua en canales abiertos que opera bajo el principio físico conocido como efecto Doppler (ultrasónico, radar, láser) para estimar la velocidad del fluido (Figura 4.14); así como un sensor de presión o de nivel por ultrasonido para determinar el área de la sección transversal de flujo. Se basa en el principio de la energía acústica que retorna al transductor después de que un haz ultrasónico se proyecta en un líquido homogéneo; el transductor convierte la energía sonora en energía eléctrica. Debido a que el fluido está en movimiento, la transmisión de la onda sónica que se mueve por el fluido es recibida por el transductor a una frecuencia diferente de aquella a la cual fue enviada. Esta diferencia entre las frecuencias enviada y recibida es directamente proporcional a la velocidad de flujo, y se conoce como frecuencia de corrimiento Doppler.

El buen funcionamiento de los sistemas ultrasónicos de efecto Doppler está condicionado por las propiedades físicas del agua, entre ellas: conductividad sónica, densidad de las partículas en suspensión y perfil de velocidades del flujo en el momento de la medición; por tanto, una distribución no uniforme de sólidos en suspensión o la presencia de burbujas de aire en la sección transversal de la conducción genera un cálculo incorrecto de la velocidad media del flujo.

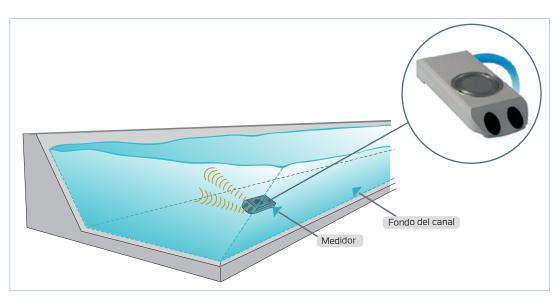
Estos medidores tienen algunas ventajas:

- Su alta precisión, que puede ser obtenida independientemente del perfil de velocidades, el caudal y la temperatura del líquido.
- **2.** La ausencia de partes móviles, lo que facilita su limpieza.

Entre las desventajas se tienen:

- Debe ser instalado en el fondo del canal, lo cual genera dificultades de mantenimiento, con riesgos potenciales de falla en los transductores debido a su recubrimiento.
- 2. Su costo es alto (más de \$ 15 millones), requiere de técnicos especializados para su servicio y mantenimiento, y debe ser programado para cada material del canal.
- **3.** Su precisión se reduce en presencia de un alto contenido de sólidos en suspensión.



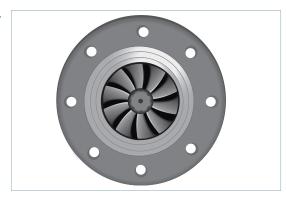


## **AFORO EN** TUBERÍAS

El aforo de agua en una tubería considera la medición directa de la velocidad del fluido (v), ya que el área transversal de flujo (A) es constante (caudal Q = v \* A). El aforo en tuberías tiene, entre otros requisitos, los siguientes:

- 1. Es necesario seleccionar un tramo recto de la tubería a una distancia de diez veces el diámetro, aguas arriba, y cinco veces el diámetro, aguas abajo.
- 2. Se debe determinar si se trata de agua limpia o con sedimentos.
- 3. Exige conocer la presión máxima del agua.
- 4. Dependiendo del principio de medición, se deben conocer la viscosidad, la conductividad eléctrica y la temperatura, entre otras características del agua.

Figura 4.15 Medidor de turbina para flujo en tuberías o pozos profundos.



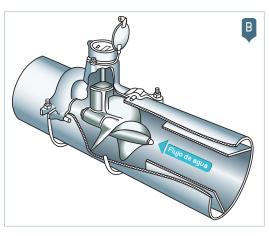
#### Figura 4.16 Medidor de hélice para flujo en tuberías o pozos profundos. A. Estructura externa. B. Componentes internos.



#### MEDIDOR DE HÉLICE PARA TUBERÍAS

El medidor de hélice para flujo en tuberías, que se conectan normalmente a la salida de los pozos profundos o en la descarga de las motobombas instaladas en cauces de agua superficial, utiliza como elemento sensor una turbina (Figura 4.15) o una hélice cónica (Figura 4.16), puesta en el centro de la corriente que circula por la tubería, la cual se conecta, a través de un sistema mecánico, a una caja de registro instalada en la parte externa y establece la lectura en un medidor analógico.

Los medidores de hélice se basan en el registro del número de vueltas o revoluciones de la hélice que ocurren por el paso del agua, que es proporcional a la velocidad de esta en la tubería. La precisión de un medidor de este tipo es aproximadamente de 5%, siempre y cuando cumpla con las condiciones de instalación recomendadas por el fabricante y reciba mantenimiento y calibración adecuados. Los medidores de hélice disponibles en el comercio se instalan en tuberías desde 0.05 m hasta 1.8 m de diámetro, y operan con velocidades de flujo entre 0.15 m/s y 5.0 m/s.



Este método requiere el establecimiento aguas arriba y aguas abajo de distancias grandes, cinco o más veces el diámetro de la tubería (D), para garantizar una lectura confiable. Los acoples mecánicos y el sensor invasivo significan un desgaste de los elementos; por tanto, es necesario garantizar el mantenimiento y la calibración de los equipos, que, por lo general, son análogos y carecen de datalogger con interfaz y sistemas de comunicación. Es común que muestren el valor del caudal de agua (l/s) y el volumen de agua acumulado (litro o m<sup>3</sup>). Los medidores de hélice actualmente disponibles son de acople magnético entre la hélice y el indicador, el cual tiene un conjunto de elementos electrónicos. El diámetro de la hélice varía entre 50% v 80% del diámetro de la tubería.

Los medidores de hélice se pueden utilizar para medir caudales en canales abiertos, pero, en este caso, es necesario colocar un tubo con el medidor instalado para forzar el agua hasta que se llena por completo. Para este fin, también se usa una tubería de entrega de agua o una alcantarilla sumergida. En sitios donde el agua contiene residuos, el medidor se instala de manera temporal para la medición y después se extrae para limpiar la hélice.

Figura 4.17
Piezómetro
instalado
aguas arriba
del orificio de
salida del tubo
horizontal de
descarga de
un pozo o motobomba.



# MÉTODO DE ORIFICIO Y PIEZÓMETRO

El piezómetro es un tubo o manguera de plástico transparente de 6 mm a 13 mm (¼ a ½ pulgada) de diámetro, que se coloca aguas arriba en un orificio formado por un anillo instalado a la salida del tubo horizontal de descarga de un pozo o motobomba. Este piezómetro se utiliza para medir la carga hidráulica del flujo de agua en el orificio, con la cual se estima el caudal que entregan el pozo o la estación de bombeo (Figura 4.17).

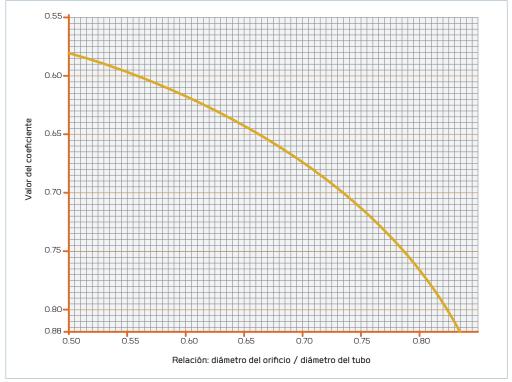
El tubo de descarga de agua debe quedar a nivel y el piezómetro se instala a 0.6 m aguas arriba del orificio de salida (Soil Conservation Society, 1973). Es fundamental que en una distancia de 1.2 m aguas arriba del piezómetro no haya accesorios como codos o válvulas. La relación entre los diámetros del orificio y del tubo debe ser entre 0.5 y 0.83. El caudal a través del orificio de salida se obtiene con la ecuación:

$$Q = C * A * (2q * h)^{1/2}$$

Donde:

- *Q*: caudal (m<sup>3</sup>/s).
- C: coeficiente obtenido de la Figura 4.18, en función de la relación entre el diámetro del orificio y el diámetro del tubo.
- A: área de la sección del orificio (m²).
- g: constante gravitacional: 9.81 m/s<sup>2</sup>.
- h: carga hidráulica medida en el piezómetro (m).

Figura 4.18 Valores del coeficiente C de la ecuación de caudal de un orificio, en función de la relación diámetro del orificio/diámetro del tubo.



Fuente: Adaptado de Soil Conservation Service (1973).

### **EJEMPLO**

#### Determinar el caudal de una tubería con orificio de salida

En un campo cultivado con caña de azúcar en el valle geográfico del río Cauca, se quiere determinar el caudal de una tubería con orificio de salida de un diámetro  $(D_0)$  de 20.32 cm (0.2032 m, 8)pulgadas) instalado en el extremo de un tubo de 25.4 cm (10 pulgadas) de diámetro, donde la carga hidráulica (h) medida en el piezómetro es de 63.5 cm (0.635 m), se tiene:

Relación entre el diámetro del orificio y el diámetro del tubo:

$$\frac{20.32 \text{ cm}}{25.4 \text{ cm}} = 0.8$$

Coeficiente C, tomado de la Figura 4.18: 0.765

$$A (m^2) = \pi \frac{D_0^2}{4} = \pi \frac{(0.2032 \text{ m})^2}{4} = 0.0324 \text{ m}^2$$

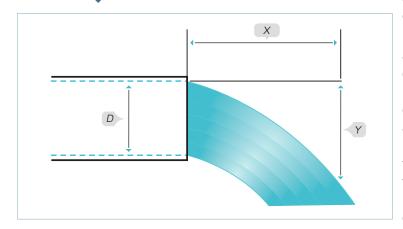
$$Q = C * A * (2 gh)^{1/2}$$

$$Q = 0.765 * 0.0324 \text{ m}^2 * (2 * 9.81 \text{ m/s}^2 * 0.635 \text{ m})^{1/2} = 0.0876 \text{ m}^3/\text{s} = 87.6 \text{ l/s}$$

## MÉTODO DE LAS COORDENADAS

Conocido también como método de la trayectoria de Purdue, consiste en medir las coordenadas X y Y del chorro de agua que sale por el extremo de un tubo colocado en la descarga de un pozo o motobomba (Figura 4.19). Se emplea solo cuando no se dispone de otros métodos más precisos de medición de flujo de agua y donde sea permisible un error del 10%. Los detalles de este método se encuentran en el Anexo B.6.

Figura 4.19
Método de las
coordenadas X
y Y del chorro
de agua de un
tubo de salida
en un pozo o
motobomba.



# MEDICIÓN CON SENSOR ELECTROMAGNÉTICO EN TUBERÍAS

Este tipo de sensores produce un campo magnético en el fluido, que genera un voltaje proporcional a la velocidad relativa del líquido conductor (Ley de inducción electromagnética de Faraday) (Figura 4.20).

El medidor requiere una conductividad eléctrica mínima del fluido y condiciones de presión y temperatura definidas por el fabricante. La distancia del tramo recto y sin accesorios aguas arriba debe ser de diez veces el diámetro de la tubería, mientras que la distancia medida aguas abajo del medidor debe ser de hasta cinco veces el diámetro de la tubería.

Aunque el sensor es invasivo, no tiene acoples mecánicos, lo cual hace menos exigente el mantenimiento. Por lo general, no requiere un proceso de recalibración y puede ser conectado fácilmente a un datalogger comercial. Esto permite medir el caudal con registro continuo y transmitirlo mediante telemetría. Su costo actual es de \$ 5 millones. Pese a ser un poco mayor que el medidor de hélice, su costo de mantenimiento es bajo.





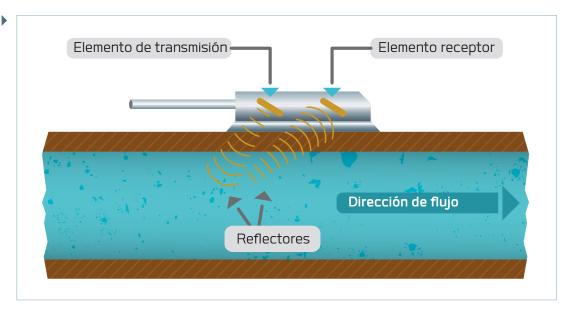
#### MEDIDOR DE ULTRASONIDO

Estos sensores generan un eco ultrasónico en el fluido y calculan el tiempo que tarda en atravesar la sección de flujo en ambos sentidos (ida y regreso), lo que permite obtener una medida adecuada de la velocidad del agua. Para estos medidores, no existen condiciones específicas de fluido; sin embargo, este no debe contener sólidos en suspensión, y los requerimientos de longitud de tramo recto de tubería y sin obstáculos son similares a los de los sensores magnéticos. Existen versiones invasivas y no invasivas que admiten el uso de telemetría y la instalación a un datalogger comercial para obtener un registro continuo. Los costos de estos medidores son variables, entre \$ 5 y 7 millones, dependiendo del fabricante.

## MEDIDOR DOPPLER ULTRASÓNICO

Como se mencionó antes, este tipo de medidores utiliza un sensor de efecto Doppler ultrasónico para estimar la velocidad del fluido, la cual se multiplica por el área mojada para determinar el caudal. Su funcionamiento se basa en el hecho de que cuando un haz de ondas de ultrasonido se proyecta en un líquido homogéneo, parte de su energía acústica regresa de nuevo al transductor (Figura 4.21), pero con una frecuencia diferente de aquella a la cual fue enviada. Esta diferencia entre las frecuencias enviada y recibida es directamente proporcional a la velocidad de flujo, y se conoce como frecuencia de corrimiento Doppler. La precisión de estos medidores es variable, entre 2% y 5%, y su costo actual es de \$ 12 millones.

Figura 4.21 Medidor de efecto Doppler ultrasónico para determinar la velocidad de flujo por medio de la diferencia entre la frecuencia de las ondas sónicas enviada y recibida.







# CONTENIDO

	Riego por surcos	
	Diseño de riego por surcos en predios nuevos o con cambios de diseño de campo	
	Evaluación de riego por surcos	. 121
	Acciones inmediatas para el mejoramiento del riego por surcos	. 124
	Control administrativo de riego por surcos (CARS)	. 124
	Riego por surco alterno	. 124
	Riego por surcos en socas de caña quemada	
	Riego por surcos en socas de caña verde o sin quemar	. 125
	Conformación de entresurcos	. 126
	Politubulares con compuertas	. 127
	Diseño de politubulares para riego por surcos	. 127
	Tubería de PVC con compuertas	. 128
	Diseño de tuberías de PVC con compuertas	. 129
	Ampliación de la longitud de las tuberías con compuertas y su efecto en el caudal	. 130
	Economía en el uso de politubulares vs. tuberías de PVC	. 131
	Riego por pulsos	. 131
	Riego con caudal reducido	. 132
	Riego por aspersión	. 134
	Evaluación preliminar de riego por aspersión con cañones	
	Acciones inmediatas para el mejoramiento del riego por aspersión con cañones	
	Evaluación detallada del estado de los equipos de riego	
	Control administrativo del riego por aspersión	. 140
	Riego por aspersión con pivote central	. 146
	Riego por goteo de bajo costo	. 147
	Riego por goteo convencional	. 148
	Ferti-riego por goteo	. 149
6		
- 2		
<b>-</b>		Z A
1		



# INTRODUCCIÓN

En el valle geográfico del río Cauca, Colombia, existen 240,000 hectáreas cultivadas con caña de azúcar. En esta región, la precipitación es variable, con una media anual de 700 mm en el centro-sur (Yumbo, Vijes, Rozo y El Cerrito) y de 2000 mm en el extremo sur (Santander de Quilichao y Puerto Tejada) y en la parte norte (La Virginia y Viterbo), además de tener dos períodos secos entre enero y marzo, y entre junio y septiembre, durante los cuales es necesario aplicar riego suplementario en el 95% del área cultivada en caña.

En los últimos años, el agua disponible para riego ha decrecido entre el 40% y el 70%, debido al deterioro de las cuencas y al incremento en la demanda de agua para usos municipales, industriales y agrícolas. El riego es la labor más costosa del cultivo de caña y representa entre el 30% y el 60% de los costos totales de producción. Un solo evento de riego por surcos puede costar hasta \$ 250,000 por hectárea; el agua representa el costo más alto y en este rubro, la energía representa el 80%.

Los métodos de riego por surcos y de riego por aspersión con cañones son los más usados en el cultivo de caña de azúcar en la región. El primero se utiliza en el 79% del área, y el segundo, en el 21%. En este capítulo, se hace énfasis en la evaluación, control administrativo y acciones de mejoramiento de estos métodos; igualmente, se trata el diseño de riego por surcos y se presentan avances y recomendaciones para la inversión rentable en tecnologías de riego eficientes, entre ellas, el riego por pulsos, el riego con caudal reducido, el riego por aspersión con pivote central, el riego por goteo de bajo costo y el ferti-riego.





EN EL RIEGO POR SURCOS, SE PRESENTAN PÉRDIDAS POR PERCOLACIÓN, ESCORRENTÍA Y EVAPORACIÓN. Este método se utiliza desde hace más de un siglo en la región y forma parte de una cultura arraigada entre productores de caña. Consiste en un canal abierto construido en tierra y localizado en la cabecera del lote a regar. En este canal, se hacen trinchos con el fin de elevar el nivel de agua, la cual, por medio de boquetes, es vertida en la parte alta de los surcos y, desde allí, avanza por acción de la gravedad hasta el extremo final de dichos surcos; en ese momento, se suspende el flujo en la cabecera. Por esta razón, se denomina riego de avance.

En regiones diferentes al valle geográfico del río Cauca, este sistema tiene algunas variantes, entre ellas, mayor permanencia del agua después de alcanzar el extremo final del surco, o tiempo de mantenimiento del flujo. En el riego por surcos, se presentan pérdidas de agua por percolación, escorrentía y evaporación; no obstante, la forma como se hace el riego (riego de avance) y el taponamiento al final de los entresurcos en la región permite reducir las pérdidas por escorrentía y percolación profunda, sacrificando, en parte, la uniformidad en la aplicación de agua. El impacto de la baja uniformidad no se refleja claramente en el desarrollo ni en la producción de caña de los campos comerciales, debido a que el tipo de riego requerido es de carácter suplementario y las lluvias pueden compensar la baja uniformidad de la distribución del agua a lo largo del surco (Torres et al., 2004).

# DISEÑO DE RIEGO POR SURCOS EN CAMPOS CON CULTIVOS DE CAÑA ESTABLECIDOS

En el valle geográfico del río Cauca, la mayoría de los predios cultivados con caña son diseñados teniendo en cuenta la longitud de surco, la pendiente y la localización de los puntos de entrada y salida de agua en cada lote. La longitud del surco ha sido determinada de acuerdo con los criterios de la cosecha y los valores varían entre 100 m y 200 m, con un promedio de 120 m, mientras que la pendiente varía entre 0.2% y 1.0%, con una media de 0.4%. Para estos predios, el diseño de riego por surcos consiste en adaptar los factores operativos, como el caudal y el tiempo de avance, a las longitudes de surco y las pendientes establecidas, con el fin de reducir la cantidad de agua utilizada e incrementar el rendimiento de los operarios de riego.

## PROCEDIMIENTO DE DISEÑO EN CAMPOS ESTABLECIDOS

El procedimiento para el diseño de riego por surcos es el siguiente:

**1.** Calcular el espaciamiento húmedo  $(E_h)$ , definido como el ancho de la franja de terreno humedecida por cada entresurco que transporta agua (m), de acuerdo con el espaciamiento entre surcos y la modalidad de riego según el tipo de encalle, así:

$$E_h = F_e * E_s$$

Donde:

 F<sub>e</sub>: factor que depende de la modalidad de riego por surcos según el tipo de encalle.
 Para riego en encalle al 4 x 1:

$$F_e = \frac{5}{4}$$

Para riego en encalle al 2 x 1:

$$F_e = \frac{3}{2}$$

 E<sub>s</sub>: espaciamiento entre surcos. Respecto a la caña de azúcar, en el valle geográfico del río Cauca, los espaciamientos utilizados son de 1.5 m, 1.65 m y 1.75 m.

En caña plantilla, se presentan las modalidades de riego por surco continuo y por surco alterno. En estos casos, los valores que toma el factor  $F_e$  son:  $F_e = 1$  para riego por surco continuo, y  $F_e = 2$  para riego por surco alterno.

2. Determinar la lámina de riego neta (L<sub>rn</sub>) requerida que, en riego por surcos, es equivalente a la lámina de agua rápidamente aprovechable del suelo (LARA, en mm). Los valores medios encontrados en el valle geográfico del río Cauca son: 1.0 mm/cm de profundidad para suelos de textura fina, y 0.8 mm/cm de profundidad para suelos de textura media. En el Cuadro 5.1 aparecen los valores medios para lámina de riego neta (L<sub>rn</sub>) en riego por surcos, de acuerdo con la edad de la caña y la profundidad radical efectiva.

3. Seleccionar el caudal inicial por surco  $(q_s)$ . Para ello, se sugiere utilizar el Cuadro 5.2, elaborado con base en las investigaciones de Cenicaña, donde se presenta un rango de valores de caudal de acuerdo con la pendiente en la dirección del surco y la textura del suelo; por ejemplo, si la pendiente en la dirección del surco es del 0.5% y la textura del suelo es fina, para empezar el proceso, se selecciona el caudal de 5 l/s.

#### Cuadro 5.1

Valores medios para la lámina de riego neta  $(L_{rn})$  en riego por surcos, de acuerdo con la edad de la caña, la profundidad radical efectiva y la textura del suelo, en el valle geográfico del río Cauca, Colombia.

٦			7	
`	٦	,		

Edad	Profundidad radical		riego neta n mm)
(meses)	(meses) efectiva (cm)		Textura media (mm)
< 2	30	30	24
2 a 4	50	50	40
> 4	70	70	56

#### Cuadro 5.2

Caudal por surco (l/s) en cultivo de caña de azúcar, en función de la pendiente en la dirección del surco y de la textura del suelo. Valle geográfico del río Cauca, Colombia.

4	7
	•

Pendiente en	Familia textural del suelo*			
de surco	Fina	Media	Gruesa	
0% - 0.3%	4 - 8	4 - 7	4 - 6	
0.3% - 0.6%	2 - 6	3 - 6	2 - 4	
0.6% - 1%	1 - 3	1 - 2	0.5 - 3	
> 1%	0.1 - 1	0.1 - 0.5	0.1 - 0.3	

\*Familia de textura fina: Ar, FAr, ArL, FArL. Familia de textura media: F, FL, L. Familia de textura gruesa: ArA, FArA, FA, AF, A. F = franco; Ar = arcilla; L = limo; A = arena.

- 4. Determinar la eficiencia de aplicación requerida ( $E_a$ ). Se sugiere utilizar un valor entre el 60% y el 70% para suelos de textura fina, y del 50% para suelos de textura media. En el riego de germinación y establecimiento del cultivo, no se debe asignar un valor mayor al 60% ya que se trata de suelos recién roturados y la infiltración es alta.
- 5. Calcular el tiempo de avance del agua, que en el valle geográfico del río Cauca es equivalente al tiempo de aplicación ( $t_{ap}$  en minutos), mediante la siguiente ecuación:

$$t_{ap} = \frac{L_s * E_h * L_{rn}}{(60 * q_s * E_a)}$$

Donde:

- $L_s$ : longitud de surco (m).
- E<sub>h</sub>: espaciamiento húmedo o ancho de la franja de terreno húmeda por cada entresurco que transporta agua (m).
- $L_{rn}$ : lámina de riego neta (mm).
- $q_s$ : caudal por surco (l/s).
- Ea: eficiencia de aplicación (en fracción decimal).
- 6. Una vez determinado el tiempo de avance del agua en el surco, se calcula la velocidad de avance (v), utilizando la relación entre la longitud de surco y el tiempo de avance:

$$v = \frac{L_s}{t_{ap}}$$

Las velocidades de avance apropiadas para las condiciones de los suelos y pendientes en la zona azucarera de Colombia varían entre 1.0 m/min y 1.5 m/min, y pueden alcanzar valores de 2 m/min, siempre y cuando no se presenten riesgos de erosión.

Cuando la velocidad de avance (v) es menor de 0.7 m/min, se recomienda aumentar el caudal por surco y recalcular el tiempo y la velocidad, hasta que esta se aproxime al valor entre 1.0 m/min y 1.5 m/min.

Pero si el valor de v es mayor de 2 m/min, se disminuye el caudal por surco y se calculan de nuevo el tiempo y la velocidad de avance hasta que el valor de esta se aproxime al rango recomendado de 1.0 m/min a 1.5 m/min.

7. Calcular el volumen de agua neto requerido  $(V_{nr})$ :

$$V_{nr}$$
 (m<sup>3</sup>/ha) =  $L_{nr}$  (mm) \* 10

8. Determinar el volumen de agua requerido en la cabecera del campo ( $V_{rc}$ ):

$$V_{rc}$$
 (m<sup>3</sup>/ha) =  $\frac{V_{nr}}{E_a}$ 

Donde  $E_a$  es la eficiencia de aplicación, expresada como fracción decimal. La Ea sugerida para el diseño es del 60%, que expresada como fracción equivale a 0.6.

9. Calcular el volumen de agua requerido en la fuente ( $V_{rf}$ ):

$$V_{rf}$$
 (m<sup>3</sup>/ha) =  $\frac{V_{rc}}{E_c}$ 

En este caso,  $E_c$  corresponde a la eficiencia de conducción, expresada como fracción decimal. En la zona azucarera de Colombia, esta eficiencia puede corresponder a un valor de 85%, o sea 0.85.

- 10. Determinar el caudal de manejo por regador  $(Q_{mr})$ . Este puede ser de 60 l/s a 100 l/s para acequias de riego construidas en tierra, y de 80 l/s a 120 l/s para tuberías con compuertas utilizadas como reemplazo de las acequias de riego.
- 11. Calcular el número de surcos (N) que un regador puede manejar simultáneamente:

$$N = \frac{Q_{mr}}{a_s}$$

Donde  $q_s$  es el caudal por surco (l/s).

#### **EJEMPLO**

### Diseño de riego por surcos

En un predio con diseño de campo establecido, se tienen los siguientes parámetros:

- Longitud de surco (L<sub>s</sub>): 120 m
- Espaciamiento entre surcos ( $E_s$ ): 1.75 m
- Ciclo de cultivo: soca con encalle 4 x 1
- · Edad del cultivo: 6 meses
- · Textura del suelo: fina
- Pendiente en la dirección de surco: 0.5%

Procedimiento de diseño que se aplica:

**1.** Espaciamiento húmedo  $(E_h)$ :

$$F * E_s = \frac{5}{4} * 1.75 \text{ m} = 2.2 \text{ m}$$

- **2.** Lámina de riego neta  $(L_{rn})$ : 70 mm (ver Cuadro 5.1).
- **3.** Caudal por surco  $(q_s)$ : 5 l/s (ver Cuadro 5.2).
- **4.** Eficiencia de aplicación requerida  $(E_a)$ : 60% (sugerida para diseño en suelos de textura fina).
- **5.** Tiempo de aplicación  $(t_{ap})$ , equivalente al tiempo de avance  $(t_{av})$ :

$$t_{ap} = \frac{L_s * E_h * L_{rn}}{60 * q_s * E_a}$$

Donde:

$$t_{ap} = \frac{120 \text{ m} * 2.2 \text{ m} * 70 \text{ mm}}{60 * 5 \text{ l/s} * 0.6} = 102 \text{ min}$$

**6.** Velocidad de avance total (*v*):

$$v = \frac{L_s}{t_{av}} = \frac{120 \text{ m}}{102 \text{ min}} = 1.2 \text{ m/min (aceptada)}$$

La velocidad de avance está en el rango entre 1.0 y 1.5 m/min.

**7.** Volumen de agua neto requerido  $(V_{nr})$ :

$$V_{nr}$$
 (m<sup>3</sup>/ha) =  $L_{rn}$  (mm) \* 10 = 70 mm \* 10 = 700 m<sup>3</sup>/ha

8. Volumen de agua requerido en la cabecera del campo  $(V_{rc})$ :

$$V_{rc}$$
 (m<sup>3</sup>/ha) =  $\frac{V_{nr}}{E_a} = \frac{700}{0.6} = 1167 \text{ m}^3/\text{ha}$ 

9. Volumen de agua requerido en la fuente  $(V_{rf})$ :

$$V_{rf}$$
 (m<sup>3</sup>/ha) =  $\frac{V_{rc}}{E_c}$  =  $\frac{1167}{0.85}$  = 1458 m<sup>3</sup>/ha

10. Caudal de manejo por regador:

$$Q_{mr} = 120 \text{ l/s}$$

**11.** Número de surcos (*N*) que un regador puede manejar simultáneamente:

$$N = \frac{Q_{mr}}{q_s} = \frac{120 \text{ l/s}}{5 \text{ l/s}} = 24 \text{ surcos}$$

# DISEÑO DE RIEGO POR SURCOS EN PREDIOS NUEVOS O CON CAMBIOS DE DISEÑO DE CAMPO

En predios nuevos para la siembra de caña de azúcar o donde se decida cambiar el diseño de campo por razones justificadas, se recomienda armonizar ambos diseños, campo y riego, incluyendo la determinación de la longitud y la pendiente del surco.

# PROCEDIMIENTO DE DISEÑO EN PREDIOS NUEVOS

1. Seleccionar la pendiente y la longitud de surco de acuerdo con las familias de infiltración que aparecen en el Cuadro 5.3, y teniendo en cuenta que para zonas de precipitación baja a moderada (700 mm/año -1300 mm/año), la longitud de surco debe variar entre 120 m y 150 m, mientras que para zonas de precipitación alta (mayores de 1300 mm/año), debe variar entre 90 m y 110 m (Cruz, 2003).

La familia de infiltración se define como la tasa de infiltración en mm/h, que, en la mayoría de los casos, se considera constante después de 2 horas de iniciar la aplicación de agua (Roscher, 1985). Los valores de esta tasa menores de 12.5 mm/h conforman la familia de infiltración baja, los valores entre 12.5 mm/h y 37.5 mm/h corresponden a la familia de infiltración media, y los valores mayores a 37.5 mm/h determinan la familia de infiltración alta. Los valores que aparecen en el Cuadro 5.3 son el resultado de las evaluaciones hidráulicas de riego por surcos realizadas por el área de manejo de aguas de Cenicaña, en el cultivo de la caña de azúcar en el valle geográfico del río Cauca.

Cuando la tasa de infiltración en el suelo es alta (> 37.5 mm/h), los surcos deben ser cortos con el fin de reducir las pérdidas de agua por percolación, mientras que en campos con velocidades de infiltración media (12.5 mm/h - 37.5 mm/h) y baja (< 12.5 mm/h), los surcos pueden ser más largos para obtener un mayor tiempo de contacto del agua con el suelo. En suelos compactados o con estructura masiva, cuando la velocidad de infiltración es menor de 5 mm/h, es necesario recurrir al riego con caudal reducido, en el cual se aplican caudales por surco menores de 0.5 l/s o al riego por goteo.

2. Una vez seleccionadas la longitud y la pendiente de surco, el diseño de riego por surcos se hace como se describió para este sistema, en predios que cuentan con un diseño de campo establecido.

#### Cuadro 5.3

Valores de pendiente y longitud de surco para diseño de riego por surcos en caña de azúcar, según la familia de infiltración de agua en el suelo. Valle geográfico del río Cauca, Colombia.

Parámetro		Familia de infiltración	
de diseño	Baja (<12.5 mm/h)	Media (12.5 mm/h - 37.5 mm/h)	Alta (> 37.5 mm/h)
Pendiente de surco (%)	0.1 - 0.3	0.3 - 0.5	0.5 - 0.7
Longitud de surco (m)	130 - 240	100 - 200	90 - 120

Fuente: Cenicaña.

## EVALUACIÓN DE RIEGO POR SURCOS

En el sector de la caña de azúcar del valle geográfico del río Cauca, es frecuente que los productores soliciten acompañamiento técnico para mejorar la labor de riego en sus fincas, debido a los altos costos de riego, insuficiente disponibilidad de agua, logística complicada, entre otros factores. En estos casos, es necesario evaluar el riego por surcos, siguiendo este procedimiento:

## PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN DE RIEGO POR SURCOS

- Realizar una visita de campo con el fin de obtener los valores medios y extremos de los parámetros de ejecución, ojalá, de varios eventos de riego, utilizando el listado de chequeo que aparece en el Cuadro 5.4.
- 2. Una vez diligenciado el formulario de chequeo con los valores medios y extremos obtenidos en la primera visita de evaluación, se procede a determinar los indicadores de calidad de la gestión, utilizando el software de control administrativo del riego, desarrollado por Cenicaña. Para ello, se tienen las siguientes instrucciones:
  - Escriba la ruta www.cenicana.org/BH e ingrese con la clave asignada al programa Balance hídrico priorizado (v. 4.0).
  - Vaya al menú Registrar Datos y seleccione Control Administrativo del Riego para ingresar los datos recolectados durante la

- visita. Tenga en cuenta que para ingresar los datos, antes debe 'crear' la hacienda, la suerte, el pluviómetro y la fuente de agua.
- Proceda a consultar los indicadores de riego seleccionando en el menú Informes, en la opción Reporte de Control Administrativo del Riego.
- Escoja la fecha del riego objeto de control y abra el archivo de Excel® para consultar los valores de los indicadores o variables de control.
- Interprete los indicadores de calidad en la gestión de riego de acuerdo con el Cuadro 5.5.
- Elabore un informe con las acciones de mejoramiento a partir de la evaluación preliminar del riego por surcos.



Control administrativo de riego por surcos.

#### Cuadro 5.4

Listado de chequeo para evaluación preliminar de riego por surcos.

<b>▼</b>		
Hacienda y suerte	Código, nombre	
Fecha de riego	Día, mes, año	
Edad del cultivo	Meses	
Ciclo del cultivo	Plantilla	
	Soca No.	
Lámina de agua rápidamente aprovechable (LARA)	Milímetros (mm)	
Modalidad de riego por surcos	En plantilla	En soca
	Surco continuo	Surco continuo, encalle 4x1
	Surco alterno	Surco alterno modificado, encalle 4x1
		Surco continuo, encalle 2x1
		Surco alterno modificado, encalle 2x1
Familia textural del suelo	Fina	
	Media	
	Gruesa	
Hora de llegada del regador al sitio de riego	Horas: minutos (24:00)	
Hora de salida del regador	Horas: minutos (24:00)	
Hora de llegada del agua al sitio de riego	Horas: minutos (24:00)	
Caudal de agua medido en la fuente	Litros por segundo (I/s)	
Caudal por frente de riego	Litros por segundo (I/s)	
Caudal por surco	Litros por segundo (I/s)	
Tiempo de avance del agua en el surco	Horas: minutos	
Tiempo de riego en la jornada*	Horas: minutos	
Tiempo total de suspensión del agua	Horas: minutos	
Longitud del surco	Metros (m)	
Espaciamiento entre surcos	Metros (m)	
Número de surcos regados por jornada	Número (No.)	
	Muy seco	
Estado de humedad en el suelo antes del riego hasta 30 cm de profundidad	Seco	
del riego riasta so em de profundidad	Moderadamente húmedo	
¿El suelo presenta grietas?	Sí	
	No	
¿La conformación del entresurco facilita el avance del agua?	Sí	
	No	
Estado de la pendiente en la dirección del surco	Uniforme	
	Variable	
¿El agua se mueve hacia el costado?	Sí	
	No	

<sup>\*</sup>Jornada: tiempo que dura el turno de un regador, por ejemplo: 8 h, 10 h, 12 h.

Fuente: Cruz (2014).

#### Cuadro 5.5

Valores de referencia y estrategias de mejoramiento para los indicadores de calidad en la gestión del riego por surcos en caña de azúcar. Valle geográfico del río Cauca, Colombia.

Indicador	Valor de	Comentario o estrategia de mejoramiento
	referencia	
Sincronización del agua	30 min	Valor máximo sugerido para la sincronización entre la llega- da del operario regador al sitio de riego y la llegada del agua.
Jornal asignado por hectárea	≤ 0.5 j/ha	Valor máximo sugerido.
Jornal neto por hectárea	≤ 0.45 j/ha	Valor máximo sugerido.
Eficiencia administrativa	≥ 90%	Valor mínimo sugerido.
Área regada en la jornada	≥ 2 ha	Valor mínimo sugerido para una jornada de riego de 12 horas.
	500 - 1000 m <sup>3</sup> /ha	Volumen sugerido en riegos de germinación, establecimiento de la plantación, rebrote de la soca y acompañamiento de la fertilización.
Volumen de agua utilizado, medido en la fuente	750 - 1200 m <sup>3</sup> /ha	Volumen sugerido para cañas con edades entre 2 y 4 meses.
	1000 - 1400 m <sup>3</sup> /ha	Volumen sugerido para cañas con edades mayores de 4 meses.
	400 - 800 m <sup>3</sup> /ha	Volumen sugerido en riegos de germinación, establecimiento de la plantación, rebrote de la soca y acompañamiento de la fertilización.
Volumen de agua aplicado en la suerte	600 - 1000 m <sup>3</sup> /ha	Volumen sugerido para cañas con edades entre 2 y 4 meses.
	1000 - 1200 m <sup>3</sup> /ha	Volumen sugerido para cañas con edades mayores de 4 meses.
Eficiencia total de riego	> 50%	Para lograr este valor, se requiere una eficiencia de aplicación mayor al 60% y una eficiencia de conducción del 80%, como mínimo.
Eficiencia de aplicación	> 60%	En caso de que la eficiencia de aplicación sea baja, se recomienda ajustar el caudal por surco y adaptar simultáneamente el tiempo de aplicación. Con el fin de evitar las pérdidas por escorrentía, se debe taponar con tierra el final de los surcos y reducir el tiempo de aplicación. Además, se sugiere finalizar la operación de riego en el extremo aguas arriba de la acequia regadora. Finalmente, se debe reutilizar el agua perdida por escorrentía. Al final de las épocas lluviosas, se debe realizar una programación preliminar de los riegos en cada unidad productiva con el fin de asignar las fuentes de agua y revisar, mantener y reparar la infraestructura de conducción y distribución del agua con suficiente anticipación.  Con base en la inspección de campo del avance, el caudal, la pendiente, el diseño de campo, la penetración de la humedad, el desarrollo del cultivo y la condición de los surcos, se

pueden tomar medidas tales como la nivelación a precisión y la construcción y mantenimiento de surcos y acequias tanto

de riego como de drenaje.

Fuente: Cruz (2014).

Indicador	Valor de referencia	Comentario o estrategia de mejoramiento	
	> 2 m/min		en riegos de germinación y acompañamiento eniendo cuidado para no afectar la semilla.
	1.5 - 2.0 m/min	Velocidad sugerida	para el primer riego de levante.
	1.5 m/min	Velocidad sugerida	para los demás riegos.
Velocidad de avance de agua en el surco	riego, se ha en po de avance (	Tiempo de avance (min)  5  20  30 - 35  45 - 50  60  80 - 90	Para mejorar la velocidad de avance del agua en el riego por surcos, se requiere un buen aporque y, en especial, una conformación adecuada de las calles o entresurcos. Un aporque deficiente, unido a irregularidades en la pendiente por una mala nivelación o por asentamientos ocurridos en el suelo, no permite el avance adecuado del agua en los surcos. Además, se debe guiar el agua en los surcos, principalmente, en el riego de germinación y en el primer riego de levante, y remover obstáculos del entresurco como terrones grandes, piedras y malezas. Si el tiempo de avance es mayor que el sugerido, se recomienda aumentar el caudal por surco, y si el tiempo es menor, se debe disminuir el caudal.

# **ACCIONES INMEDIATAS** PARA EL MEJORAMIENTO **DEL RIEGO POR SURCOS**

Con las tecnologías de riego por surcos que se describen a continuación, es posible reducir hasta 50% el volumen de agua aplicado en cada riego, según las condiciones específicas del sitio de cultivo.

## Control administrativo de riego por surcos (CARS)

Es un método de gestión de calidad de la operación de riego que está ligado a la programación del mismo, según el balance hídrico. En el CARS, se evalúa la eficiencia de riego con respecto a los indicadores principales: consumo de agua, tiempo empleado y área regada. La evaluación se realiza durante la ejecución de cada evento de riego, con base en la medición directa y en la observación de unas pocas variables relacionadas con los indicadores de control: volumen de

agua (m³/ha), eficiencia de riego (%), área regada (ha), eficiencia administrativa (%) y profundidad de humedecimiento del suelo (cm).

#### Riego por surco alterno

Consiste en colocar el agua en cada calle o entresurco de por medio. Entre 1988 y 1994, en 22 experimentos hechos en varios ingenios de la región, Cenicaña evaluó las producciones de caña y azúcar obtenidas con este tipo de riego y comprobó que eran equivalentes a las obtenidas mediante el sistema de riego por surco continuo (Torres et al., 1997).

Entre las ventajas de este método de riego, se pueden citar:

- 1. Ahorro de agua entre el 25% y el 50% en comparación con el método de riego por surco continuo.
- 2. Mayor rendimiento de los regadores (20% a 60%).
- 3. Reducción del 35% en los costos de riego.

En términos ambientales y económicos, el ahorro de agua en riego por surco alterno puede ser de 400 m<sup>3</sup>/ha por riego. Esto significa que, en un año, si el número de riegos es de cinco, el ahorro será de 2000 m<sup>3</sup>/ha (\$ 200,000/ha), estimando que 1 m³ de agua cuesta, en promedio, \$ 100. Otra ventaja del riego por surco alterno es la ausencia de inversiones en infraestructura de campo, ya que las condiciones requeridas son iguales a las del riego por surco continuo, entre ellas: nivelación, suelos de textura fina a moderada y conformación de entresurcos libres de obstáculos. No obstante, es necesario aumentar ligeramente el caudal por surco entre 1 l/s y 2 l/s.

El riego por surco alterno se recomienda para levantamiento en plantilla o en socas con encalle a  $5 \times 1$ .

Figura 5.1
Riego por
surcos en el
encalle al 4 x 1
de caña de
azúcar.
Se sugiere
colocar el agua
en tres de las
cuatro calles
sin residuos.



Figura 5.2
Opción económica de riego por surcos en el encalle 4 x 1 de caña de azúcar.



Los riegos de germinación o acompañamiento de la fertilización se deben hacer por surco continuo y, preferiblemente, por aspersión, con el fin de aplicar láminas de agua controladas que no superen los 40 mm por riego. En suelos con textura franco arcillosa y de infiltración alta, el caudal por surco alterno debe ser de 3 l/s a 5 l/s, y el tiempo total de avance para longitudes de surco de 120 m puede ser de 80 minutos. En suelos arcillosos que presenten grietas, se recomiendan caudales por surco entre 4 l/s y 6 l/s.

# Riego por surcos en socas de caña quemada

En campos de caña quemada previamente a la cosecha, la cantidad de residuos en campo es baja, lo que facilita el encalle mecánico al 4 x 1 y al 6 x 1. En el encalle 4 x 1 se sugiere colocar el agua en tres de las cuatro calles sin residuos (Figura 5.1). Sin embargo, en los períodos abril-junio y octubre-diciembre, si se presentan épocas sin lluvias y el balance hídrico señala la necesidad de aplicar riego, o en períodos muy secos cuando se disminuye drásticamente la disponibilidad de agua para riego, es viable tomar la opción económica de colocar el agua en dos calles no contiguas sin residuos (Figura 5.2).

## Riego por surcos en socas de caña verde o sin quemar

Después de la cosecha de caña verde, los residuos en el campo se pueden encallar al 2 x 1 o 2 x 2. En el encalle 2 x 1, donde se dejan dos calles libres de residuos y otra con residuos, se sugiere colocar el agua en los surcos libres de residuos, convirtiéndose así en riego a 2 x 1, como se observa en la Figura 5.3.

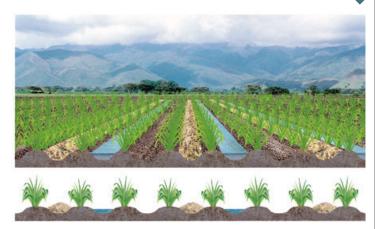
No obstante, durante los períodos lluviosos de abril-junio y octubre-diciembre, en caso de que se presenten épo-

Figura 5.3 Riego por surcos en el encalle 2 x 1 de caña de azúcar.

cas sin lluvias y el balance hídrico señale la necesidad de aplicar riego, se puede adoptar la opción económica de colocar el agua en una de las dos calles sin residuos, como se observa en la Figura 5.4. Igualmente, en socas con encalle 2 x 2, se recomienda realizar el riego vertiendo el agua en las calles sin residuos.



Opción económica de riego por surcos en el encalle 2 x 1 de caña de azúcar. El agua se coloca en una de las dos calles sin residuos.



En el encalle 2 x 1, el porcentaje de surcos en los que se coloca el agua es del 67%, lo que significa la ausencia de riesgos de déficit de humedad para el cultivo, siempre y cuando la aplicación se haga en suelos de textura fina a moderada. En este caso, el ahorro potencial de agua es del 33%, o sea por debajo del que se alcanza en surco alterno, que es del 50%.

Durante los períodos de alta probabilidad de lluvias, es posible colocar el agua en una de las dos calles sin residuos, que representa el 33% de los surcos, y la economía potencial de este insumo es del 67%, es decir, mayor que en surco alterno.

En el encalle 2 x 2, el agua se coloca en el 50% de los surcos, lo que significa que es un método similar al riego por surco alterno, aunque, en este caso, por el hecho de dejar dos calles contiguas sin agua, se corre el riesgo de déficit de humedad para el cultivo, cuando este ocurre en alguna de las dos épocas secas del año. En épocas de alta probabilidad de lluvia, este riego es una buena opción, puesto que representa una economía potencial de agua del 50%, similar a la que se obtiene con el riego por surco alterno.

#### Conformación de entresurcos

Para los riegos en las etapas de germinación y establecimiento de la plantación, entre la siembra y los 2 meses de edad, se requieren láminas de agua pequeñas (30 mm a 40 mm) y se recomienda conformar un surco superficial amplio sobre la hilera de trozos de semilla de caña, con el fin de aplicar caudales altos que faciliten el flujo de manera rápida a velocidades mayores de 2 m/min.

En los riegos posteriores a los de germinación y establecimiento (también llamados riegos de levantamiento), se ha observado que, además de la uniformidad en la pendiente, es importante que los entresurcos tenga una conformación geométrica de base amplia, ojalá, con dos surcos pequeños en forma de V, en ambos lados de la calle, para facilitar el flujo de agua lo más cerca posible a las hileras de plantas y así humedecer la zona de raíces (Figura 5.5).

Figura 5.5 Conformación del entresurco con dos surcos pequeños en forma de V, en ambos lados de la calle, para facilitar el flujo del agua cercano a las hileras de plantas.



# POLITUBULARES CON COMPUERTAS

Son mangueras de polietileno virgen resistentes a los rayos ultravioleta (Figura 5.6), con diámetro entre 15.2 cm y 53.3 cm (6 a 21 pulgadas), calibre entre 0.38 mm y 0.48 mm (15 y 19 milésimas de pulgada) y durabilidad de 2 a 3 años. En la zona azucarera de Colombia, diámetros de 45.7 cm y 53.3 cm (18 y 21 pulgadas) son los más comunes en estructuras de entrega donde la carga de presión fluctúa entre 0.3 m y 1.4 m.

En 1990, el Ingenio Central Castilla, en conjunto con Cenicaña, inició la evaluación de los politubulares con compuertas y se logró un ahorro de agua de 400 m<sup>3</sup>/ha por cada riego (Benítez, 1994). Posteriormente, el Ingenio Manuelita realizó otra evaluación y obtuvo

un ahorro de agua de 600 m<sup>3</sup>/ha (Rebolledo, 1997). Además, se consiguió un incremento de 21% en el rendimiento de los regadores en Castilla y de 47% en Manuelita. Cuando se utilizan politubulares, es posible incorporar al cultivo un área o franja de terreno de 150 m<sup>2</sup> por cada hectárea para alcanzar una producción extra de caña de 1.8 t y de azúcar de 207 kg, asumiendo una producción de 120 t/ha y un rendimiento en azúcar de 11.5%. Otro beneficio, no menos importante, es la facilidad para el desplazamiento de los equipos de cosecha y cultivo, debido a que se eliminan las acequias de riego.

No obstante sus ventajas, los politubulares también tienen limitaciones, como son la alta susceptibilidad a daños o robos y las restricciones de uso en terrenos con pendientes superiores a 0.5% o con topografía irregular.

# Diseño de politubulares para riego por surcos

De acuerdo con Cruz et al. (2003b), en la selección del diámetro de un politubular para transportar un caudal de agua de 150 l/s en una longitud de 600 m, asumiendo la condición más crítica para un politubular, como es la instalación en una cabecera de campo sin pendiente, el primer paso consiste en proponer un diá-

Figura 5.6 Utilización de politubular con compuertas en reemplazo de las acequias de riego, para riego por surcos.



metro de 16 pulgadas (0.406 m), para calcular las pérdidas por fricción (h,) utilizando la ecuación de Hazen-Williams, así:

$$Q = 0.2786 * C * D^{2.63} * S^{0.54}$$

#### Donde:

- Q: caudal en m<sup>3</sup>/s.
- C: coeficiente de Hazen-Williams = 150 para politubulares.
- D: diámetro del politubular en metros.
- S:  $h_f/L$ ;  $h_f$ : pérdida de energía (m) causada por la fricción, L: longitud del politubular en metros.

De la ecuación anterior, se despeja S y luego  $h_{f}$  quedando:

$$h_f = \left(\frac{Q}{0.2786} * C * D^{2.63}\right)^{1/0.54} * L$$

$$h_f = \left(\frac{0.150}{0.2786} * 150 * 0.406^{2.63}\right)^{1/0.54} * 600$$

$$h_f = 1.44 \text{ m}$$

Esta pérdida por fricción debe ser menor que la presión máxima recomendada por los fabricantes para el diámetro propuesto. Las presiones máximas recomendadas son: 3.5 m para 10 pulgadas, 2.3 m para 12 y 14 pulgadas, y 1.4 m para 16, 18 y 21 pulgadas.

En este caso, la pérdida por fricción para el diámetro de 16 pulgadas, propuesto inicialmente, es mayor que la presión máxima recomendada, que es de 1.4 m; por consiguiente, se propone un diámetro mayor (18 pulgadas) y se calculan las pérdidas por fricción para este nuevo diámetro ( $h_f = 0.8 \text{ m}$ ). Dado que cumplen con la condición mencionada, se selecciona el diámetro de 18 pulgadas.

> Figura 5.7 Tubería portátil de PVC con compuertas para riego por surcos.

## TUBERÍA DE PVC **CON COMPUERTAS**

El sistema de riego en tubería rígida con compuertas para riego por surcos, está conformado por:

- Estación de bombeo o pozo profundo, similar a la del riego por gravedad tra-
- Tubería principal de PVC enterrada, con hidrantes metálicos en la cabecera de cada tablón.
- Tubería secundaria portátil de PVC, en diámetros de 15.2 cm (6 pulgadas), 20.3 cm (8 pulgadas) y 25.4 cm (10 pulgadas), tubos de 9 m de longitud con compuertas corredizas (Figura 5.7). La presión máxima de trabajo de esta tubería es de 158.5 kPa, equivalente a 1.6 kg/cm<sup>2</sup>, 23 psi (psi = lb/pulgada cuadrada) o 16.1 m de columna de agua.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos con los politubulares, en 1994, se inició la evaluación de la tubería de PVC con compuertas, que fue igualmente positiva. Por ejemplo, con este sistema, el rendimiento de un regador en la jornada de 12 h puede pasar de 2 ha/día a 5 ha/día, con un ahorro de agua aproximado de 600 m<sup>3</sup>/ha por cada riego, debido a la reducción de las pérdidas de agua tanto en la conducción como en la cabecera de los surcos, y el efecto de la mayor área regada (Cruz et al., 2003b).

La tubería de PVC tiene una durabilidad entre 8 y 12 años y permite regar áreas con topografía variable, pues



el agua puede avanzar en contra de la pendiente y sobrepasar montículos y depresiones; por tanto, es versátil como reemplazo de las acequias regadoras en tierra o como conductor de agua desde la fuente hasta los campos.

### Diseño de tuberías de PVC con compuertas

De acuerdo con Cruz et al. (2003b), la carga de presión en el punto de entrega de agua a la tubería de PVC con compuertas, debe ser suficiente para compensar las pérdidas de carga por fricción más la carga estática, pero sin exceder la carga hidráulica máxima de 23 psi (16.1 m de columna de agua). Aunque algunos fabricantes de tubería de PVC para riego con compuertas admiten un valor máximo de 50 psi (35 m), se considera que esta presión solo es admisible para tuberías principales de PVC (sin compuertas).

Para seleccionar el diámetro de la tubería de PVC, es necesario calcular las pérdidas por fricción utilizando la ecuación de Hazen-Williams:

$$Q = 0.2786 * C * D^{2.63} * S^{0.54}$$

Donde:

- Q: caudal en m<sup>3</sup>/s.
- C: coeficiente de Hazen-Williams = 150 para tuberías de PVC.
- D: diámetro de la tubería en metros.
- S: h<sub>f</sub>/L: h<sub>f</sub>: pérdidas de energía (m) causadas por la fricción.
- L: longitud de la tubería en metros.

En Colombia, los diámetros comerciales de tubería de PVC con compuertas son de 6, 8 y 10 pulgadas, y la relación diámetro exterior/espesor de pared (RDE) es de 81. Para prevenir golpes de ariete es importante mantener la velocidad del agua en las tuberías por debajo de 2 m/s; además, la válvula de cierre o apertura debe ser operada de manera lenta.

Cuando se diseñan sistemas que constan de varias líneas de tuberías de compuertas, los cálculos se deben iniciar en la línea más lejana, asignando una presión máxima de 23 psi en el punto donde comienza dicha línea, y una presión mínima de 4 psi y un caudal de 5 l/s en la última compuerta.

Para ilustrar la selección del diámetro de la tubería, a continuación, se presentan tres casos para un caudal de 150 l/s y una longitud de 600 m.

#### Diseño de tubería de PVC a nivel

Se propone un diámetro nominal (D) de tubería de 10 pulgadas (0.254 m), que equivale a un diámetro interno  $(D_i)$  de 0.250 m, para un RDE de 81:

$$D_i = D - \frac{D}{81}$$

Y se calcula la pérdida de carga por fricción  $(h_f)$  a partir de la ecuación de Hazen-Williams, así:

$$O = 0.2786 * C * D^{2.63} * S^{0.54}$$

De la ecuación anterior, se despeja S y luego  $h_f$  quedando:

$$h_f = \left(\frac{Q}{0.2786} * C * D^{2.63}\right)^{1/0.54} * L$$

$$h_f = \left(\frac{0.150}{0.2786} * 150 * 0.250^{2.63}\right)^{1/0.54} * 600$$

$$h_f = 14.97 \text{ m}$$

Esta pérdida por fricción debe ser menor que la diferencia entre las cargas máxima (23 psi = 16.1 m) y mínima (4 psi = 2.8 m), recomendadas para tuberías de PVC con compuertas. Esta diferencia es de 19 psi (13.3 m), o sea que el diámetro nominal debe ser aumentado a 12 pulgadas (0.3048 m), equivalente a un diámetro interno de 0.301 m, con lo cual  $h_f$  sería de 6.16 m, menor que la máxima recomendada.

Sin embargo, teniendo en cuenta que las tuberías con compuertas de 12 pulgadas de diámetro son muy pesadas, se recomienda ajustar el caudal para disminuir la pérdida de carga por fricción a un valor menor o igual a 13.3 m; el nuevo caudal ajustado sería de 140 l/s.

### Diseño de tubería de PVC en pendiente

Para los datos del ejemplo anterior, si la pendiente a favor es de 0.2%, al valor de las pérdidas por fricción para 10 pulgadas (14.97 m) se le debe restar la ganancia de carga hidráulica por efecto de dicha pendiente, que, en este caso, es de 1.2 m:

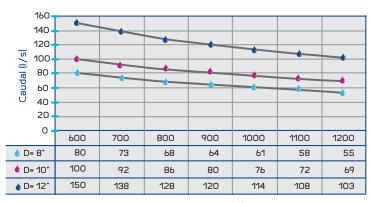
$$1.2 \text{ m} = \frac{0.2 \text{ m}}{100 \text{ m}} * 600 \text{ m}$$

Dando como resultado:

$$14.97 - 1.20 = 13.77 \text{ m}$$

Este valor es mayor que la diferencia entre las cargas máxima y mínima recomendadas para tuberías de PVC con compuertas, que debe ser de 13.3 m (19 psi), o sea que sería necesario aumentar el diámetro a 12 pulgadas, para que  $h_f$  sea de 6.16 m y cumpla con la condición. Sin embargo, como en el anterior caso, en lugar de aumentar el diámetro a 12 pulgadas, se ajusta el caudal para disminuir la pérdida de carga por fricción a un valor menor o igual a 13.3 m, así, el nuevo caudal ajustado sería de 147 l/s.

Figura 5.8 Disminución del caudal debido a la ampliación de la longitud de la tubería de PVC con compuertas.



Longitud (m)

#### Diseño de tubería en contra de la pendiente

Si la pendiente del terreno en contra es de 0.3%, la carga estática para la longitud de 600 m es de 1.8 m:

$$1.8 \text{ m} = \frac{0.3 \text{ m}}{100 \text{ m}} * 600 \text{ m}$$

A la pérdida de carga por fricción correspondiente al diámetro de 10 pulgadas (14.97 m), se le debe agregar esta carga estática para un resultado de 16.77 m, que es mayor que la máxima recomendada (13.3 m). De nuevo, en este caso, en vez de incrementar el diámetro a 12 pulgadas, se ajusta el caudal para reducir la pérdida de carga por fricción a un valor menor o igual a 13.3 m, de esta forma, el nuevo caudal ajustado sería de 130 l/s.

## Ampliación de la longitud de las tuberías con compuertas y su efecto en el caudal

La ampliación de la longitud de las tuberías de PVC con compuertas en un predio donde se ha establecido este sistema es una decisión que debe ser analizada en detalle, debido a que los caudales se reducen de manera drástica, si no se incrementa la presión en el punto de inicio (Figura 5.8).

Como ejemplo, se tiene el caso de una tubería con compuertas de diámetro 0.254 m (10 pulgadas), que originalmente fue diseñada para transportar un caudal de 100 l/s. Si la longitud inicial de la tubería de 600 m se amplía en 50%, es decir, a 900 m, el caudal se reduce en 20%, lo que significa un nuevo caudal de 80 l/s; pero si se duplica (1200 m), el caudal se reduce en 31% (caudal nuevo de 69 l/s).

# ECONOMÍA EN EL USO DE POLITUBULARES *VS.* TUBERÍAS DE PVC

En Cenicaña, se compararon las ventajas económicas en el uso de politubulares y tuberías de PVC con compuertas para riego por surcos (Cruz et al., 2003b), y se encontró que para caudales entre 100 l/s y 150 l/s, los politubulares deben tener diámetros entre 14 y 18 pulgadas y una carga de presión entre 0.3 m y 1.4 m; mientras que las tuberías de PVC con compuertas deben tener entre 8 y 12 pulgadas y de 2.8 m a 16.1 m de presión, y de 14 m a 35 m para las tuberías principales de conducción.

La evaluación económica de ambos sistemas se hizo utilizando criterios decisorios como el valor presente de la utilidad (VPU) y el valor anual equivalente de la utilidad (VAU). El primer criterio consiste en desplazar al período cero la utilidad, definida como los beneficios menos los gastos; mientras que el VAU transforma las utilidades de cada alternativa en una serie uniforme que ocurre al final de cada uno de los años de vida útil.

El análisis se realizó teniendo en cuenta los siguientes escenarios:

- **1.** Aplicación de 4, 5 o 6 riegos por ciclo de cultivo.
- 2. Agua extraída de pozo profundo.
- 3. No se requiere presión extra para el funcionamiento de la tubería de PVC, o sea que el pozo profundo suministra agua con la presión requerida por la tubería.
- Inversión con recursos propios o financiados.

Los análisis mostraron que tanto el *VPU* como el *VAU* fueron positivos en todos los escenarios, por consiguiente, la inversión en tubería de PVC y politubulares con compuertas se justifica desde el punto de vista económico.

A medida que aumenta el número de riegos por ciclo de cultivo, los beneficios económicos se incrementan.

El escenario de recursos propios para las inversiones mostró más ventajas que el de recursos financiados. Los criterios de decisión favorecieron la inversión en tubería de PVC; no obstante, es conveniente advertir que si se requiere bombeo extra para lograr las presiones de trabajo adecuadas en las tuberías, se necesitarían nuevas inversiones tanto en el comienzo como durante la operación y el mantenimiento del sistema. El beneficio por ahorro de agua presentó el mayor peso en las utilidades, aunque se debe tener en cuenta que parte del ahorro de agua se obtiene por efecto del mayor rendimiento del riego comparado con el método tradicional que utiliza acequias construidas en tierra.

#### RIEGO POR PULSOS

Este sistema tiene un alto potencial para mejorar la eficiencia de riego, y se define como la aplicación intermitente de agua en los surcos, utilizando una válvula T de mariposa con un controlador (Figura 5.9), a la que se le conectan dos líneas laterales de tubería con compuertas instaladas en la cabecera del lote o tablón (Figura 5.10).

La válvula abre hacia uno de los laterales, y el primer pulso de agua avanza desde la cabecera del lote hasta una fracción de la longitud total del surco –por ejemplo, hasta los 40 m, si la longitud total es de 140 m–; luego, la válvula cierra el flujo en este lateral y abre hacia la otra línea durante un tiempo similar al primero.

Una vez se realiza el primer pulso en ambos laterales, la válvula vuelve a abrir hacia la primera línea y el flujo avanza más rápido en este segundo pulso, debido a que el agua sella el suelo al pasar por la superficie, lo que genera una fuerte disminución de la veloci-

Figura 5.9 Válvula T de mariposa para riego por pulsos.



dad de infiltración. El proceso se repite hasta que, después de 3 o 4 pulsos, el agua alcanza el extremo final del surco. Cabe anotar que el riego por pulsos también puede ser operado manualmente por un regador, sin necesidad de adquirir la válvula con controlador solar.

Cenicaña y los ingenios Manuelita y Providencia realizaron treinta evaluaciones de riego por pulsos en surco alterno y lo compararon con riego con caudal continuo (Cruz et al., 2003). En Manuelita encontraron que el riego por pulsos utiliza 29% menos volumen de agua que el riego con caudal continuo, con un aumento de 50% en el área regada por día y 35% de reducción en costos. Por otra parte, en el Ingenio Providencia se obtuvo un ahorro de agua de 22% y un aumento en el rendimiento de los regadores de 46%, cuando se utilizó riego por pulsos. Además, la uniformidad en la aplicación de agua por pulsos fue alta (89%) comparada con la alcanzada con el riego convencional por caudal continuo.

Si se toma como base el ahorro mínimo de agua de 240 m<sup>3</sup>/ha por cada evento de riego obtenido mediante el riego por pulsos, en un año con cuatro riegos en promedio, el ahorro es de 960 m<sup>3</sup>/ha.

Para aprovechar el potencial de riego por pulsos en cuanto al ahorro de agua, los campos deben estar bien nivelados y aporcados, en lo posible sin grietas, con

entresurcos libres de residuos de malezas o caña, y con caudal de 4 l/s por surco.

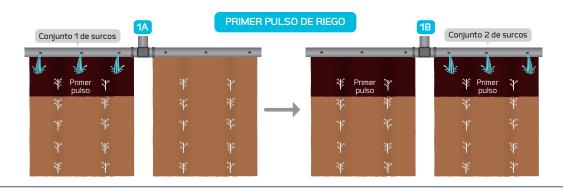
En suelos que se agrietan, se debe reducir la frecuencia de riego para evitar la sequedad extrema; esto se logra programando los riegos mediante balance hídrico con valores de lámina de agua rápidamente aprovechable (LARA), calculados con un factor de agotamiento de 40% del agua total aprovechable. En riego por pulsos, cuando la tubería de compuertas es distribuida en un tablón, ubicando los dos conjuntos de surcos que se riegan simultáneamente a iguales distancias de la válvula, los caudales aplicados por surco son iguales y el avance del agua es más uniforme.

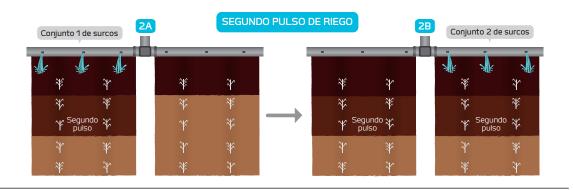
### RIEGO CON CAUDAL REDUCIDO

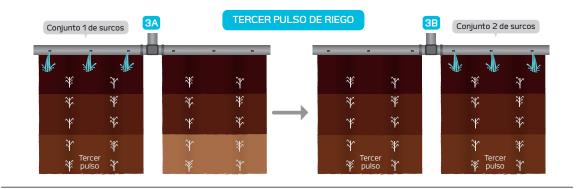
Consiste en aplicar bajos caudales de agua por surco, entre 0.1 l/s y 0.3 l/s (Figura 5.11). Campos y Cruz (2010) evaluaron este sistema en zonas de piedemonte del valle geográfico del río Cauca, a 1050 msnm, con pendientes mayores a 1%, suelos poco profundos con alto contenido de fragmentos rocosos, baja capacidad de almacenamiento de agua y alto riesgo de erosión, donde se cultivan aproximadamente 51,000 ha con caña de azúcar, y encontraron que es la mejor alternativa económicamente viable en predios con baja disponibilidad de agua (menor a 40 l/s), permitiendo, en algunos casos, incrementos de más de 20 t/ha en la producción de caña.

Una ventaja del riego con caudal reducido en el pie de loma es la disminución del riesgo de erosión en el suelo, debido a los bajos caudales que se manejan; en consecuencia, los tiempos de avance son largos, cercanos a 24 horas en surcos de 120 m a 130 m de longitud, y gracias a la facilidad de operación, permiten riegos frecuentes como se requiere en estos suelos.

Figura 5.10 Riego por pulsos o aplicación intermitente de agua a los surcos.







### RIEGO TERMINADO





Figura 5.11 Riego con caudal reducido (0.1 | /s -0.3 l/s) en suelos de piedemonte.

Adicionalmente, el riego con caudal reducido facilita el ferti-riego o aplicación de fertilizantes con el riego, proporcionando un nivel de humedad y nutrimentos en el suelo, de acuerdo con la edad y el desarrollo del cultivo, para garantizar el aumento en la productividad a un costo razonable.

Este sistema de riego, aunque fue desarrollado para zonas de piedemonte, ha sido adoptado en zonas planas, en suelos de texturas finas, donde se utilizan tubos cortos de PVC, politubulares o tuberías con compuertas para colocar el agua en la cabecera de los surcos de riego.

Entre los requisitos del sistema de riego con caudal reducido se encuentran:

1. La necesidad de pruebas de avance e

- infiltración en surcos, con el fin de determinar el tiempo y el caudal a aplicar en cada surco y en cada riego.
- 2. Un diseño previo que armonice las condiciones topográficas y de suelo con las hidráulicas, para establecer las dimensiones de las tuberías y garantizar así el caudal necesario y la lámina de agua requerida.

En la zona azucarera de Colombia, en socas con encalle 2 x 1, se han alcanzado ahorros de agua hasta del 47%, en comparación con riego por surcos convencional a 2 x 1 y producciones de caña similares, cuando el agua se ha colocado en una de las dos calles sin residuos (riego a 1 x 2) de manera alterna en el tiempo.

La tecnología de riego con caudal reducido tiene un costo de inversión aproximado de \$ 1,600,000/ha que incluye los valores de los materiales y la mano de obra para la instalación de las tuberías.

Una de las ventjas del riego con caudal reducido es que facilita el cambio progresivo, seguro y de bajo costo hacia tecnologías de riego y fertilización (ferti-riego) de alta eficiencia (riego por goteo), en franjas de terreno donde el desarrollo del cultivo es pobre, a causa de los suelos con alto contenido de piedra.

# **RIEGO** POR ASPERSIÓN

En el valle geográfico del río Cauca, el riego por aspersión con cañones ha sido tradicionalmente utilizado tanto en caña de azúcar, donde cubre 21% del área regada, como en otros cultivos (Figura 5.12). Estos cañones trabajan a presiones de 6 kg/cm $^2$  (85 psi) o 9 kg/cm $^2$  (125 psi), y son instalados en tubería portátil de aluminio de 5 a 6 pulgadas de diámetro, o incorporados a motobombas, por lo que se denominan moto-cañones (Figura 5.13).

Este sistema de riego puede alcanzar eficiencias de aplicación entre 80% y 85%. Sin embargo, requiere una alta inversión inicial de capital en motobomba, tubería y accesorios, lo que lo hace económicamente inviable, sobre todo, si se

Riego por aspersión con dos cañones y presión de 6 kg/cm² (85 psi), instalados en tubería portátil.



Figura 5.13

Riego por aspersión
con un cañón de 9 kg/cm²
(125 psi) de presión, incorporado a una motobomba (motocañón).



compara con el riego por goteo de bajo costo que desarrolla Cenicaña en conjunto con ingenios, en especial, en suelos con alto contenido de piedra como las consociaciones Nima (Entic Haplustolls, familia francosa fina sobre esquelética arenosa) y Esneda (Typic Haplusterts, familia arcillosa sobre esquelética arcillosa). No obstante, sigue siendo usado principalmente en zonas de piedemonte y en etapas de germinación y establecimiento del cultivo, donde permite aplicar láminas pequeñas controladas de 30 mm a 40 mm.

Una solución parcial para amortizar el alto costo de operación de este tipo de riego, específicamente, en la zona de piedemonte, es el aprovechamiento de las altas pendientes para obtener toda o parte de la carga hidráulica requerida por los cañones; por ejemplo, cañones que operan con una presión de 85 psi requieren una carga hidráulica equivalente de 60 m.

# EVALUACIÓN PRELIMINAR DE RIEGO POR ASPERSIÓN CON CAÑONES

Antes de hacer recomendaciones a un productor para el mejoramiento de riego por aspersión con cañones en su finca, se debe evaluar de forma preliminar la ejecución del riego, de acuerdo con el siguiente procedimiento:

- Inspeccionar el estado general de los equipos de riego que funcionan en el campo, en cuanto a fugas de agua y presiones, tanto en la descarga de la bomba como en la salida de los cañones.
- 2. Dibujar un esquema de la disposición del equipo en el campo y la forma como se ha-

- cen los cambios de posición de los cañones y la motobomba.
- **3.** Estimar la lámina de riego neta aplicada por el equipo ( $L_{rn}$  en mm), así:

$$L_{rn} = I_a * T_a$$

Donde:

- I<sub>a</sub>: intensidad de aplicación del sistema de riego (mm/h).
- Ta: tiempo de aplicación del aspersor (h).

 $I_a$  se puede calcular utilizando la siguiente ecuación:

$$I_a = \frac{3600 * q_a}{E_I * E_p}$$

#### Donde:

- $q_a$ : caudal de descarga del aspersor (l/s).
- E<sub>1</sub>: espaciamiento (m) entre dos posiciones de un cañón a lo largo del lateral.
- $E_p$ : espaciamiento (m) entre dos posiciones de un cañón a lo largo de la línea principal.

En general, para los equipos que se utilizan en la zona azucarera de Colombia:  $I_a = 12 \text{ mm/h}$  a 15 mm/h para cañones sobre tubería portátil, y 15 mm/h a 18 mm/h para cañón incorporado a la motobomba (moto-cañón).

El valor de  $T_a$  es variable dependiendo del tipo de riego: para germinación o acompañamiento a la fertilización es de 2 h, para cultivo de caña en edades entre 2 y 4 meses es de 2.5 h, y para cultivo de caña en edades mayores de 4 meses es de 3 h.

- 4. Obtener los valores medios de los siguientes parámetros de ejecución del riego: espaciamiento entre cañones en el lateral y entre laterales (m x m), número de posiciones del aspersor durante el turno de riego diario, caudal suministrado al equipo de riego (l/s), tiempo total del turno de riego (h) y tiempos no efectivos de riego (suma de los tiempos de espera de aqua, encendido de la motobomba, suministro de combustible, cambios de posición de los cañones y suspensiones de agua).
- 5. Una vez se haya recolectado la información anterior, se calcula el área regada por turno, el tiempo efectivo de riego y el volumen de agua suministrado al equipo.

## Área regada por turno de riego

Para estimar el área regada por turno de riego ( $A_{rt}$  en ha), se utiliza la ecuación:

$$A_{rt} = A_p * N_p$$

#### Donde:

- $A_p$ : área regada por posición de un cañón (ha): espaciamiento (m) entre posiciones de un cañón a lo largo de la línea lateral  $(E_i)$ , multiplicado por el espaciamiento (m) entre posiciones de un cañón a lo largo de la línea principal  $(E_n)$ .
- N<sub>p</sub>: número total de posiciones de los cañones en un turno de riego. En el caso de riego con dos cañones: suma del número de posiciones del cañón 1 + número de posiciones del cañón 2.

#### **EJEMPLO**

## Cálculo de área regada por turno

Un equipo de riego por aspersión con dos cañones y tubería portátil se instala con un espaciamiento entre posiciones de cada cañón a lo largo del lateral ( $E_I$ ) de 7 tubos:

$$7 * 9.144 m = 64.01 m$$

El espaciamiento entre posiciones de cada cañón a lo largo del principal  $(E_n)$ también es de 7 tubos:

$$7 * 9.144 m = 64.01 m$$

Por tanto, el área regada por posición de cada cañón  $(A_p)$  es de:

$$64.01 \text{ m} * 64.01 \text{ m} = 4097.02 \text{ m}^2 \text{ o } 0.41 \text{ ha}$$

El número de posiciones de cada cañón durante el turno de riego es de 3. El número total de posiciones de los cañones en un turno de riego  $(N_p)$  es:

$$3 + 3 = 6$$
 posiciones

Y el área regada por turno de riego  $(A_{rt})$  es:

$$4097.02 \text{ m}^2 * \frac{1 \text{ ha}}{10.000 \text{ m}^2} * 6 \text{ posiciones} = 2.46 \text{ ha}$$

## Tiempo efectivo de riego (t<sub>ef</sub> en horas)

Es el tiempo total (h) del turno de riego menos la suma de los tiempos no efectivos de riego, esto es, tiempos de espera del agua, encendido de la motobomba, llenado de combustible, cambios de posición de los cañones y suspensiones de agua.

El siguiente es un ejemplo de tiempo efectivo de riego por aspersión:

- Tiempo total del turno de riego (t<sub>t</sub>): 12 h
- Hora de llegada de regadores al sitio de riego: 06:00
- Hora de llegada del agua al sitio de riego: 06:30
- Tiempo de espera del agua (sincronización):
   06:30 06:00 = 30 min
- Tiempo de encendido de la motobomba: 35 min
- Tiempo de provisión de combustible: 20 min
- Tiempo en cambios de posición de los cañones: 95 min
- Tiempo de suspensiones de agua: 0 min
- Tiempo efectivo de riego  $(t_{ef})$ :

$$\frac{12 \text{ h} - (30 + 35 + 20 + 95) \text{ min}}{(60 \text{ min/h})} = 12 \text{ h} - 3 \text{ h} = 9 \text{ h}$$

# Volumen de agua suministrado al equipo de riego ( $V_{II}$ en $m^3$ /ha)

Se calcula como:

$$v_u = \frac{Q_e * t_{ef}}{A_{rt}} * 3.6$$

Donde:

•  $Q_e$ : caudal suministrado al equipo (l/s)

•  $t_{ef}$ : tiempo efectivo de riego (h)

• A<sub>rt</sub>: área regada en el turno (ha)

• 3.6: factor de conversión de unidades

$$3.6 = \frac{l}{s} * h * \frac{m^3}{1000 l} * \frac{3600 s}{1 h}$$

### **EJEMPLO**

## Cálculo del volumen de aqua suministrado

Se tiene un caudal suministrado al equipo en campo ( $Q_e$  en I/s)= 50 I/s, un tiempo efectivo de riego ( $t_{ef}$ )= 9 h, y un área regada en el turno ( $A_{rt}$ )= 2.46 ha. Por tanto:

$$v_u = \frac{50 \text{ l/s} * 9 \text{ h}}{2.46 \text{ ha}} * 3.6 = 659 \text{ m}^3/\text{ha}$$

Una vez se han obtenido los datos anteriores (área regada por turno de riego, tiempo efectivo de riego y volumen de agua utilizado por el equipo), durante la visita de evaluación preliminar de riego por aspersión, se comparan con los valores de referencia en el Cuadro 5.6 y se elabora un informe con los resultados de la evaluación y las recomendaciones básicas para mejorar el sistema de riego por aspersión en la explotación.

#### Cuadro 5.6

Valores de referencia de los indicadores obtenidos en la evaluación preliminar de riego por aspersión con cañones.

•				
Indicador	Unidad	Valor de referencia	Etapa de cultivo	
Área regada por turno de riego de 12 h	ha	> 2.5	_	
Tiempo efectivo de riego para turno de 12 h	h	> 10.5	_	
Volumen de agua utilizado por el equipo de riego en la suerte	m <sup>3</sup> /ha	300-500	Riego hasta los 2 meses de edad.	
		500-700	Riego a partir de los 2 meses de edad.	

# **ACCIONES INMEDIATAS PARA** EL MEJORAMIENTO DEL RIEGO POR ASPERSIÓN CON CAÑONES

A continuación, se incluyen algunas acciones para mejorar la eficiencia del riego por aspersión con cañones:

- 1. Suministrar el caudal estrictamente necesario para el funcionamiento del equipo, evitando pérdidas de agua en el trincho donde se instala la motobomba.
- 2. Realizar una evaluación detallada del estado de los equipos de riego y establecer un plan de mantenimiento para evitar las fugas de agua y la disminución en la presión de trabajo del equipo.

- 3. Bifurcar la tubería inmediatamente después de la descarga de la bomba para disminuir las pérdidas de presión y evitar la reducción del caudal y la intensidad de aplicación de agua en los aspersores.
- 4. Efectuar diariamente el control administrativo de riego.

# **EVALUACIÓN DETALLADA** DEL ESTADO DE LOS **EQUIPOS DE RIEGO**

Para la evaluación detallada del estado de cada uno de los componentes de los equipos de riego, se puede utilizar el formato diseñado por Cenicaña que aparece en el Cuadro 5.7.

Fecha:	Hacienda:		
Suerte No.			
Equipo No.	Edad del cultivo: meses		
Motor			
Marca:			
Potencia:			
¿El motor presenta falla?	Sí	No	
La causa de falla es:			
Sistema eléctrico	Sí	No	
Sistema de inyección	Sí	No	
Sistema de refrigeración	Sí	No	
Otra causa			
¿El motor tiene tacómetro?	Sí	No	
¿El tacómetro está en buen estado?	Sí	No	
r.p.m. del motor			
Bomba			
Marca			
¿La bomba presenta falla?	Sí	No	
La causa de la falla es:			
¿Tiene manómetro indicador de presión?	Sí	No	
¿Presenta fuga de agua?	Sí	No	
Presión de salida de la bomba	psi		
¿Sella bien el 'cheque' de la granada?	Sí	No	
¿Sella bien la unión entre tubería o manguera de succión y la bomba?	Sí	No	

Cuadro 5.7 Formato para evaluar el estado de equipos de riego por aspersión con cañones.

Cañones		
Cañón No. 1		
Marca:		
Tipo de boquilla:		
Diámetro de la boquilla:		
¿Tiene frenos?	Sí	No
¿Tiene manómetro en buen estado?	Sí	No
Presión de salida del cañón	psi	
Número de tubos que alcanza a mojar		
¿Tiene boquilla para aplicación cercana?	Sí	No
¿Tiene tapada la boquilla de aplicación cercana?	Sí	No
¿Presenta fuga de agua el cañón?	Sí	No
Causa de la fuga:		
Cañón No. 2		
Marca		
Tipo de boquilla:		
Diámetro de la boquilla:		
¿Tiene frenos?	Sí	No
¿Tiene manómetro en buen estado?	Sí	No
Presión de salida del cañón	psi	
Número de tubos que alcanza a mojar:		
¿Tiene boquilla para aplicación cercana?	Sí	No
¿Tiene tapada la boquilla de aplicación cercana?	Sí	No
¿Presenta fuga de agua el cañón?	Sí	No
Causa de la fuga:		
Tubería y accesorios		
¿El cuello de cisne está roto?	Sí	No
¿Los empaques del cuello de cisne están en buen estado?	Sí	No
Número de llaves disponibles:		
Número de llaves que deben ser revisadas o cambiadas:		
Número total de tubos de descarga:		
¿El equipo tiene asignación completa de tubos?	Sí	No
Número de tubos rotos:		
Número de tubos en buen estado:		
Número de empaques de caucho que deben ser cambiados:		
Número de resortes que deben ser cambiados:		
Número de codos disponibles:		
Número de codos rotos:		
Observaciones:		
Elaboró:		

## **CONTROL ADMINISTRATIVO** DEL RIEGO POR ASPERSIÓN

Consiste en medir cada día, directamente en campo, los parámetros que aparecen en el Cuadro 5.8, con el objetivo de determinar los indicadores de calidad en la ejecución del riego para, con base en ellos, tomar las medidas necesarias y desarrollar programas de mejoramiento en temas como calidad de la mano de obra empleada y operación óptima de los equipos de riego.

Entre los principales indicadores de la calidad se pueden mencionar: área re-

gada por turno, tiempo efectivo de riego, volumen de agua aplicado, eficiencia de aplicación, eficiencia administrativa y número de jornales asignados por hectárea. Esta actividad de control debe servir para realimentar los valores iniciales de los parámetros de control, entre ellos, jornales por hectárea y eficiencia administrativa e hidráulica, a partir de un análisis estadístico dirigido a encontrar los valores máximos y mínimos admisibles para cada indicador, de acuerdo con las condiciones específicas del sitio como suelo, topografía, diseño de campo y disponibilidad de agua.

Cuadro 5.8 Formato para medir los parámetros de campo del control administrativo del riego por aspersión con cañones.

Hacienda y suerte	Código, nombre
Fecha de riego	Día, mes, año
Edad del cultivo	Meses
Ciclo del cultivo	Plantilla
	Soca No.
Lámina de agua rápidamente aprovechable (LARA)	Milímetros (mm)
Método de riego	Dos cañones en tubería portátil Cañón incorporado (moto-cañón)
Familia textural del suelo	Fina
	Media
	Gruesa
Hora de llegada de los regadores al sitio de riego	Horas: minutos (24:00)
Hora de salida de los regadores	Horas: minutos (24:00)
Hora de llegada del agua al sitio de riego	Horas: minutos (24:00)
Número de regadores por equipo	Número (No.)
Distancia entre cañones $(E_l * E_p)$	Número de tubos x Número de tubos
Número de posiciones cañón No. 1*	Número (No.)
Número de posiciones cañón No. 2	Número (No.)
Tiempo por posición	Horas: minutos
Caudal por fuente	Litros por segundo (l/s)
Caudal por equipo de riego	Litros por segundo (l/s)
Tiempo total de suspensión del agua	Horas: minutos
Estado de humedad del suelo antes de riego hasta 30 cm de profundidad	Muy seco
	Seco
	Moderadamente seco
¿El suelo presenta grietas?	Sí No
¿Se produce escorrentía?	Sí No
Observaciones:	
Elaboró:	

<sup>\*</sup>Número de posiciones del cañón No. 1 en el turno empleado en riego.

### **EJEMPLO**

# Control administrativo de riego por aspersión con cañones y tubería portátil

Teniendo en cuenta que los tres indicadores principales de calidad en riego por aspersión con cañones y tubería portátil: área regada por turno de riego ( $A_{rt}$  en ha), tiempo efectivo de riego ( $t_{ef}$  en h) y volumen de agua utilizado por el equipo de riego ( $V_u$  en m³/ha), ya fueron analizados en la sección "Evaluación preliminar de riego por aspersión con cañones", se sugiere al lector seguir los ejemplos allí desarrollados y considerar los resultados que se obtuvieron.

Área regada por turno de riego:

$$A_{rt} = 2.46 \text{ ha}$$

• Tiempo efectivo de riego:

$$t_{ef} = 9 \text{ h}$$

 Volumen de agua utilizado por el equipo de riego:

$$V_{II} = 659 \text{ m}^3/\text{ha}$$

A partir de estos valores, se calculan los demás indicadores de control administrativo del riego por aspersión con cañones:

#### Eficiencia de aplicación ( $E_a$ en %)

Es un indicador de las pérdidas de agua durante el riego. Si se asume que con el riego se suministra una lámina de agua igual o mayor que la lámina requerida por el cultivo, la eficiencia de aplicación ( $E_a$ ) se puede calcular como:

$$E_a = \frac{V_a}{V_{cc}} * 100$$

Donde:

•  $V_a$ : volumen de agua aplicado (m³/ha) =  $L_{rn}$  \* 10, siendo  $L_{rn}$  la lámina de riego neta aplicada por el equipo de aspersión (mm).

•  $V_u$ : volumen de agua suministrado al equipo (m<sup>3</sup>/ha).

A continuación, se calcula la eficiencia de aplicación de acuerdo con los siguienes datos:

- Intensidad de aplicación del cañón:
   14 mm/h
- Tiempo de aplicación del cañón: 3 h
- Lámina de riego neta (L<sub>rn</sub>):

$$14 \text{ mm/h} * 3 \text{ h} = 42 \text{ mm}$$

• Volumen de agua aplicado:

$$42 \text{ mm} * 10 = 420 \text{ m}^3/\text{ha}$$

- Volumen de agua utilizado por el equipo: 659 m<sup>3</sup>/ha
- Eficiencia de aplicación  $(E_a)$ :

$$\left(\frac{420}{659}\right) * 100 = 64\%$$

(Significa que se perdió 36% de agua).

 La eficiencia de aplicación en riego por aspersión debe ser mayor a 80%.

### Eficiencia administrativa ( $E_{ad}$ en %)

Se define como:

$$E_{ad} = \left(\frac{t_{ef}}{t_t}\right) * 100$$

Donde:

- t<sub>ef</sub>: tiempo efectivo de riego expresado en horas (h), definido como el tiempo total del turno de riego, menos los tiempos no efectivos.
- *t<sub>t</sub>*: tiempo total del turno de riego (h).

Para el cálculo de la eficiencia administrativa, utilizamos la siguiente información:

- Tiempo total del turno de riego: 12 h
- Tiempo total de los cambios de posición de los cañones, aprovisionamiento de combustible y arranque de la motobomba: 3 h
- Tiempo efectivo de riego  $(t_{ef})$ :

$$12 h - 3 h = 9 h$$

$$E_{ad} = \left(\frac{t_{ef}}{t_t}\right) * 100 = (9h/12h)*100 = 75\%$$

La eficiencia administrativa de riego debe ser mayor a 90%.

## Número de jornales asignados por hectárea $(j_a/ha)$

Es el tiempo total empleado, expresado en jornales por unidad de área (ha). Un jornal equivale a 8 horas de trabajo por persona. Para calcular el número de jornales asignados, se tienen los siguientes datos:

- Tiempo total del turno: 12 h
- Número de regadores por turno y por equipo de riego: 3
- Tiempo efectivo de riego  $(t_{ef})$ : 9 h
- Área regada por turno de riego  $(A_{rt} \text{ en ha}): 2.46 \text{ ha}$
- Jornal asignado por hectárea:

$$\left(\frac{12 \text{ h}}{8 \text{ h}}\right) * \left(\frac{3 \text{ regadores}}{2.46 \text{ ha}}\right) = 1.8 \text{ jornales/ha}$$

## Profundidad de humedecimiento del suelo ( $P_h$ en cm)

Es la distancia hasta donde desciende el agua en el suelo después de la aplicación del riego. Se puede conocer mediante instrumentos compuestos de sensores para medir la humedad del suelo, como el tensiómetro, el TDR (reflectómetro de dominio de tiempo) y el FDM (medidor de dominio de frecuencia). Si no se cuenta con alguno de estos instrumentos, se puede usar una varilla de hierro con un diámetro de 3/8 de pulgada (9.5 mm); que se introduce dos a tres días después del riego, aplicando una fuerza constante hasta que se perciba una resistencia mayor en el suelo, lo cual indica el sitio hasta donde descendió el agua aplicada. La profundidad de humedecimiento  $(P_h)$  también se puede estimar usando la siguiente fórmula:

$$P_h = \frac{\left(\frac{V_a}{10}\right)}{IARA}$$

#### Donde:

- $V_a$ : volumen aplicado (m<sup>3</sup>/ha).
- LARA: lámina de agua rápidamente aprovechable (mm/cm).

Dado un volumen aplicado de 420 m<sup>3</sup>/ha, en un suelo cuya *LARA* es 0.9 mm/cm, la profundidad de humedecimiento ( $P_h$ ) es:

$$\frac{\left(\frac{420 \text{ m}^3/\text{ha}}{10}\right)}{0.9 \text{ mm/cm}} = 47 \text{ cm}$$

Una vez obtenidos los datos anteriores (área regada por turno de riego, tiempo efectivo de riego, volumen de agua suministrado al equipo, eficiencia de aplicación, eficiencia administrativa, número de jornales asignados por hectárea y profundidad de humedecimiento del suelo), se comparan con los valores de referencia en el Cuadro 5.9 y se elabora un informe con las recomendaciones básicas para mejorar el sistema de riego por aspersión en la finca.

#### Cuadro 5.9

Valores de referencia de los indicadores obtenidos en el control administrativo de riego por aspersión con cañones.

Indicador	Unidad	Valor de referencia	Etapa de cultivo
Área regada por turno de riego de 12 h	ha	> 2.5	_
Tiempo efectivo de riego para turno de 12 h	h	> 10.5	_
Volumen de agua aplicado en la suerte	m³/ha	300-500	Riego hasta los 2 meses de edad.
		500-700	Riego a partir de los 2 meses de edad.
Eficiencia de aplicación	%	> 80	_
Eficiencia administrativa	%	> 90	_
Número de jornales asignados por hectárea	No.	< 1.6	_
Profundidad de humedecimiento del suelo	cm	< 40	Riego hasta los 2 meses de edad.
		<60	Riego a partir de los 2 meses de edad.

#### **EJEMPLO**

# Control administrativo de riego por aspersión con moto-cañón

**1.** Área regada por turno de riego ( $A_{rt}$  en ha) para un equipo de riego con moto-cañón:

$$A_{rt} = A_D * N_D$$

#### Donde:

- $A_p$ : área regada por posición del moto-cañón (ha) = distancia entre posiciones de cañón sobre el callejón ( $E_l$ ), multiplicado por la distancia entre posiciones de cañón, medida de forma transversal al callejón ( $E_p$ ).
- N<sub>p</sub>: número total de posiciones del moto-cañón durante un turno de 12 horas.

#### Cálculo del área regada por turno

 Distancia entre posiciones de cañón sobre el callejón (E<sub>I</sub>) = 8 tubos.

$$8 \text{ tubos} * 9.144 \text{ m} = 73.15 \text{ m}$$

• Distancia entre posiciones de cañón, medida de forma transversal al callejón  $(E_p) = 10$  tubos.

$$10 \text{ tubos} * 9.144 \text{ m} = 91.44 \text{ m}$$

• Área regada por posición, en sistema de moto-cañón ( $A_p$ ):

$$73.15 \text{ m} * 91.44 \text{ m} = 6689.02 \text{ m}^2 = 0.67 \text{ ha}$$

- Número total de posiciones del moto-cañón en un turno de riego (N<sub>p</sub>):
   4 posiciones
- Área regada por turno de riego  $(A_{rt})$ :

$$\left(\frac{6689.02 \text{ m}^2}{10,000 \text{ m}^2/\text{ha}}\right) * 4 \text{ posiciones} = 2.68 \text{ ha}$$

#### Cálculo del tiempo efectivo de riego

- Tiempo total (h) del turno de riego (t<sub>t</sub>): 12 h
- Hora de llegada de regadores al sitio de riego: 06:00
- Hora de llegada del agua al sitio de riego: 06:30
- Tiempo de espera del agua (sincronización): 06:30 - 06:00 = 30 min
- Tiempo de encendido de la motobomba: 35 min
- Tiempo de suministro de combustible: 20 min
- Tiempo de los cambios de posición del moto-cañón: 35 min
- Tiempo de suspensión del agua: 0 min
- Tiempo efectivo de riego  $(t_{ef})$ :

$$12 h - \left(\frac{30+35+20+35 min}{60 min/h}\right) = 12 h - 2 h = 10 h$$

**3.** Volumen de agua suministrado al equipo  $(V_{ij} \text{ en m}^3/\text{ha})$ :

$$v_u = \frac{Q_e * t_{ef}}{A_{rt}} * 3.6$$

#### Donde:

- Q<sub>e</sub>: caudal entregado al equipo en campo (I/s).
- $t_{ef}$ : tiempo efectivo de riego (h).
- A<sub>rt</sub>: área regada en el turno (ha).

#### Cálculo del volumen suministrado

- Caudal suministrado al equipo en campo  $(Q_e)$ : 50 l/s.
- Tiempo efectivo de riego ( $t_{ef}$ ): 10 h.
- Área regada en el turno  $(A_{rt})$ : 2.68 ha.

$$V_u = \frac{Q_e * t_{ef}}{A_{rt}} * 3.6 = \frac{50\frac{1}{S} * 10 \text{ h}}{2.68 \text{ ha}} * 3.6 = 673 \text{ m}^3/\text{ha}$$

**4.** Eficiencia de aplicación ( $E_a$  en %). Es un índice de las pérdidas de agua en el riego. Si se asume que el riego suministró una lámina mayor o igual a la requerida, se puede calcular la eficiencia de aplicación ( $E_a$ ), así:

$$E_a = \frac{V_a}{V_{tt}} * 100$$

#### Donde:

•  $V_a$ : volumen de agua aplicado

$$(m^3/ha) = Lrn * 10$$

Donde *Lrn* es la lámina de riego neta (mm).

•  $V_u$ : volumen de agua suministrado al equipo de riego (m<sup>3</sup>/ha).

### Cálculo de la eficiencia de aplicación

- *L<sub>rn</sub>*: 42.5 mm
- Volumen aplicado:

$$42.5 \text{ mm} * 10 = 425 \text{ m}^3/\text{ha}$$

- Volumen suministrado al equipo: 673 m<sup>3</sup>/ha
- Eficiencia de aplicación ( $E_{ap}$ ):

$$E_{ap} = \frac{425}{673} * 100 = 63\%$$

(Significa que se perdió 37% de agua).

- Recordemos que la eficiencia de aplicación en riego por aspersión debe ser mayor a 80%.
- **5.** Eficiencia administrativa ( $E_{ad}$  en %). Se define como:

$$E_{ad} = \frac{t_{ef}}{t_t} * 100$$

# Donde:

- t<sub>ef</sub>: tiempo efectivo de riego expresado en horas (h).
- t<sub>t</sub>: tiempo total del turno de riego (h).

#### Cálculo de la eficiencia administrativa

- Tiempo total del turno de riego: 12 h
- Tiempo total de los cambios de posición de los cañones, aprovisionamiento de combustible, arranque de la motobomba: 2 h
- Tiempo efectivo de riego  $(t_{ef})$ :

$$12 h - 2 h = 10 h$$

$$E_{ad} = \frac{t_{ef}}{t_t} * 100 = \frac{10 \text{ h}}{12 \text{ h}} * 100 = 83\%$$

La eficiencia administrativa debe ser mayor a 90%.

**6.** Número de jornales asignados por hectárea  $(j_a/\text{ha})$ . Es el tiempo total en horas empleado en la labor de riego, expresado en jornales por unidad de área (ha). Un jornal equivale a 8 horas de trabajo por persona.

#### Cálculo de los jornales asignados

- Tiempo total del turno: 12 h
- Número de regadores por turno y por equipo de riego: 2
- Tiempo efectivo de riego (tef): 10 h
- Área regada por turno de riego ( $A_{rt}$  en ha): 2.68 ha
- Jornales asignados por hectárea:

$$\frac{12 \text{ h}}{8 \text{ h}} * \frac{2 \text{ operarios}}{2.68 \text{ ha}} = 1.1 \text{ jornales/ha}$$

7. Profundidad de humedecimiento del suelo  $(P_h)$ . Cabe recordar que se puede determinar en el campo usando instrumentos como el tensiómetro, el TDR y el FDM. La profundidad de humedecimiento  $(P_h)$  también se puede estimar usando la siguiente fórmula:

$$P_h = \frac{\left(\frac{V_a}{10}\right)}{LARA}$$

#### Donde:

- Va: volumen aplicado (m³/ha).
- LARA: lámina de agua rápidamente aprovechable (mm/cm).

# Cálculo de la profundidad de humedecimiento

Dado un volumen aplicado de 425 m<sup>3</sup>/ha en un suelo con *LARA* de 0.9 mm/cm, la profundidad de humedecimiento  $(P_h)$  será:

$$P_h = \frac{\left(\frac{425 \text{ m}^3/\text{ha}}{10}\right)}{0.9 \text{ mm/cm}} = 47 \text{ cm}$$

Una vez obtenidos los valores de cada uno de los indicadores del control administrativo, de acuerdo con los datos recolectados en un turno de ejecución de riego por aspersión con moto-cañón, se comparan con los valores de referencia que se presentaron en el Cuadro 5.9 y se elabora un informe con las recomendaciones de mejoramiento de riego por aspersión con moto-cañón.



Figura 5.14 Riego por pivote central.

### RIEGO POR ASPERSIÓN CON PIVOTE CENTRAL

Es un sistema por aspersión montado en torres, con movimiento circular continuo alrededor de un punto estático denominado pivote, conectado directamente al suministro de agua, que puede ser de caudal medio (< 60 l/s) y bajo consumo de energía (Figura 5.14). La inversión inicial en un sistema de pivote central es de aproximadamente \$ 5 millones por hectárea (US\$ 1700).

Cenicaña, con la colaboración de dos haciendas de la región localizadas en suelos de textura franca fina (molisoles de moderada infiltración y alta fertilidad), con una precipitación media anual de 700 mm, evaluó el riego por pivote central con el objeto de identificar los factores de diseño y operación del sistema, en las condiciones de nuestra región. En la hacienda Malimbú, el pivote central cubre un área de 105 ha, y consta de nueve torres espaciadas cada 61.6 m, con una longitud total de 579 m. En la hacienda Josepilla, el área cubierta por el pivote es de 51 ha, con siete torres distanciadas cada 54.2 m y una longitud total de 409.1 m. Cada equipo utiliza un caudal de 60 l/s.

Los resultados de la evaluación hidráulica mostraron los siguientes valores medios: eficiencia de aplicación, 86%; coeficiente de uniformidad, 84%; y uniformidad en la distribución de agua, 82%.

Los siguientes son algunos de los hallazgos y recomendaciones en dichas evaluaciones:

- La uniformidad en la aplicación de agua es afectada por la presencia de vientos fuertes, especialmente, en horas de la tarde.
- La lámina de riego neta requerida debe ser aplicada en un solo pase del equipo.
- En el establecimiento de plantillas, el equipo debe ser operado con baja humedad del suelo y láminas pequeñas.
- Láminas entre 15 mm y 25 mm pueden ser suficientes para llevar el suelo a niveles de capacidad de campo en los primeros 25 cm de profundidad.
- Se debe aplicar el balance hídrico priorizado para la programación de los riegos.
- Es indispensable configurar el reemplazo de la fuente de energía del equipo para evitar problemas en su funcionamiento.

Cuando el riego por pivote central se comparó con el sistema de riego por surcos, se encontró que en el primero, la cantidad de agua aplicada por ciclo de cultivo de 13 meses fue de 3076 m<sup>3</sup>/ha, mientras que en el segundo fue de 4845, lo que significa un ahorro de agua de 36.5%. Cabe anotar que los volúmenes de agua en riego por surcos variaron entre 1100 y 1200 m<sup>3</sup>/ha por riego, que se consideran bajos, si se tiene en cuenta que los valores medios reportados en el sector son de 1300 m<sup>3</sup>/ha por riego.

# RIEGO POR GOTEO DE BAJO COSTO

Esta idea de aplicación de riego surgió de un trabajo de investigación en riego con caudal reducido, realizado por investigadores de Cenicaña y el Ingenio Manuelita, en la hacienda Cabaña, con resultados positivos en el desarrollo del cultivo de caña, excepto en algunas franjas de suelo donde el desarrollo era pobre. Una vez analizadas las posibles causas de esta condición, se concluyó que el problema era ocasionado por los altos contenidos de piedra, la alta infiltración y la baja capacidad de retención de agua en el suelo.

Con el fin de solucionar esta situación, se decidió la aplicación de riego por goteo, aprovechando la infraestructura existente de riego con caudal reducido. Para ello, fue necesaria la instalación de filtros de anillos, válvulas de control y varias cintas con goteros integrados de bajo costo, sobre el suelo, al lado de las líneas de plantas (Figura 5.15).

De lo anterior, se obtuvo un sistema de riego por goteo de bajo costo (\$3,400,000/ ha en 2014), llamado localmente GotRed, por la unión de las palabras Goteo y Reducido, que indican una combinación de riego con caudal reducido y riego por goteo. El GotRed ha mejorado significativamente el desarrollo de las plantas de caña en estas franjas de terreno con problemas de suelo, a un costo inferior al del sistema convencional de riego por goteo, generando, además, una cultura de riego localizado con tecnología apropiada y mano de obra local, mediante la aplicación del concepto de Agricultura Específica por Sitio (AEPS), una de las estrategias de investigación en Cenicaña en la actualidad.

Es importante mencionar que, en el desarrollo del sistema de riego por goteo de bajo costo, han participado otros ingenios como Castilla, La Cabaña y Mayagüez.

Figura 5.15 Riego por goteo de bajo costo instalado en franjas pedregosas.





(A) Filtro de anillos, (B) Válvula de control y (C) Cinta superficial de goteo.

# **RIEGO POR GOTEO** CONVENCIONAL

En el valle geográfico del río Cauca, el método de riego por goteo ha sido evaluado desde la década de 1980; sin embargo, actualmente, la cobertura de dicho método es de solo el 0,2% del área sembrada en caña. Este método se define como la aplicación de agua localizada, de bajo caudal, baja presión y alta frecuencia, con el objetivo de proporcionar un nivel de humedad adecuado y constante para garantizar un desarrollo óptimo del cultivo.

Este sistema es una tecnología ampliamente probada en Hawái, Australia, Sudáfrica y Mauricio. Entre sus ventajas se encuentran: funciona a baja presión, presenta un ahorro significativo en consumo de energía, requiere bajos caudales, tiene alta eficiencia de aplicación (> 90%), es económico en cuanto a mano de obra y consumo de agua, es un vehículo para la aplicación de fertilizantes, reduce la presencia de malezas y permite el aprovechamiento de suelos marginales de baja fertilidad y baja capacidad de retención de agua. No obstante, tiene algunas desventajas frente a otros sistemas de riego como son: altos costos de inversión inicial y mantenimiento, requiere agua de alta calidad física y química, es susceptible al taponamiento de los goteros, requiere una cultura de riego diferente al riego por surcos o aspersión y tiene alta posibilidad de acumulación de sales en el suelo.

Su alto requerimiento en inversión inicial para la instalación (US\$ 2500 a US\$ 3000 por hectárea) lo hace inviable para la mayoría de los productores de caña en la zona azucarera de Colombia. En condiciones de suelos de textura fina con alta capacidad de retención de agua, su frecuencia debe ser intermedia (3 a 6 días) para evitar problemas por saturación constante y obstrucción de los emisores con minerales en estado de reducción.

Es importante tener en cuenta que, en el valle geográfico del río Cauca, la precipitación aporta más del 70% de los requerimientos hídricos de la caña, mientras que en otras zonas, donde la adopción del riego por goteo es alta, este aporte es del 20% o menos. Las evaluaciones de este sistema, realizadas en Cenicaña, han permitido sacar algunas conclusiones, entre ellas:

- El volumen de agua utilizado es el 50% del que consume el riego por surco alterno, lo cual lo hace promisorio en zonas de baja disponibilidad de agua o suelos franco arenosos.
- En predios de alta productividad, no se han encontrado diferencias en producción de caña por la aplicación de riego por goteo vs. otros métodos de aplicación.
- El sistema de riego por goteo se programa, mediante el balance hídrico, con una frecuencia máxima de dos veces por semana.
- Las mangueras laterales que soportan los emisores pueden ser colocadas en forma alterna, es decir, surco de por
- La siembra en surco doble de 2.6 m x 0.6 m es promisoria en riego por goteo, debido al ahorro del 33% en mangueras laterales.



**EL RIEGO POR GOTEO** SE DEFINE COMO LA APLICACIÓN DE AGUA LOCALIZADA, DE BAJO CAUDAL. BAJA PRESIÓN Y ALTA FRECUENCIA.

- El 'enchorre' de la caña, al momento de la cosecha por los corteros, debe quedar bien alineado. Además, es necesario calibrar los patines de la alzadora y controlar el tráfico de los vagones.
- Los caudales de los emisores o goteros pueden ser de 2 a 4 litros por hora,

espaciados entre 50 y 70 cm, teniendo presente, en este caso o cuando se utilice cinta de goteo, la estimación de la tasa de aplicación, que no debe ser demasiado baja, es decir, no menor a 3 mm/hora.

# FERTI-RIEGO POR GOTEO

Con base en los resultados positivos obtenidos en la investigación de riego por goteo, Cenicaña inició, en 2008, el proyecto de ferti-riego, con el objetivo de generar nuevas opciones de manejo del cultivo que reduzcan los costos de riego y fertilización y aumenten la productividad de la caña de azúcar. De acuerdo con Cruz (2012), la evaluación de este sistema permite concluir lo siguiente:

- Las producciones de caña fueron mayores en los tratamientos de ferti-riego por goteo, donde se aplicó el 100% y el 80% de las dosis de nitrógeno (N) (125 kg/ha y 100 kg/ha, respectivamente) y potasio (K) (60 kg/ha y 48 kg/ha) recomendadas por Cenicaña. El nitrógeno se fraccionó así: dos dosis de 40% a los 3 y 4 meses de edad de la caña, y el 20% restante a los 5 meses de edad. El potasio se fraccionó en cuatro aplicaciones: 19% a los 3 meses de edad, 30% a los 4 meses, 11% a los 5 meses y 10% del 6º al 9º mes.
- Las parcelas que recibieron dosis de ferti-riego por goteo equivalentes a 60% de N y una dosis igual de K, presentaron producciones similares a las del testigo con fertilización convencional (125 kg/ha de N y 60 kg/ha de K) en una sola aplicación mecanizada.



Instalación de ferti-riego.

- El ferti-riego por goteo es promisorio para reducir las dosis de N y K, y los costos actuales de esta labor.
- El ferti-riego por goteo presenta beneficios ambientales debido al menor volumen de residuos de fertilizantes que drena hacia los acuíferos y a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> como resultado del menor empleo de maquinaria.

En otras evaluaciones del sistema de ferti-riego, Campos et al. (2015) encontraron que, en la zona de piedemonte, con pendiente superior a 1%, topografía irregular, suelo de textura francosa fina sobre esquelética fragmental, de escasa profundidad y abundante contenido de

fragmentos de roca (> 30%), es posible reducir las dosis de nitrógeno entre 12% y 28%, sin que se afecte la productividad del cultivo. Los resultados comerciales obtenidos en estos suelos muestran que el riego con caudal reducido debe ser utilizado donde las condiciones de suelo sean favorables, y el riego por goteo en las áreas con problemas de suelo. Adicionalmente, se muestra la conveniencia de realizar ferti-riego tanto con caudal reducido como por goteo, aplicando dosis de nutrimentos fraccionadas de forma creciente entre 4 y 7 meses de edad de la caña. Las mayores producciones se obtuvieron mediante el ferti-riego por goteo, con el 26% más que el testigo convencional regado por aspersión y fertilización líquida manual.



Anexo A.1  Determinación al tacto de la textura del suelo
Anexo A.2 Métodos para medir la infiltración
Método de los anillos infiltrómetros
Método del caudal de entrada y salida en un surco para medir la infiltración159
Anexo A.3  Lámina de agua rápidamente aprovechable ( <i>LARA</i> )  de los suelos del valle geográfico del río Cauca
Anexo B.1  Tabla para la calibración de canaletas sin cuello en condiciones de flujo libre
Anexo B.2 Principios de hidráulica para diseño de vertederos de cresta larga
Anexo B.3 Diseño y calibración de vertederos de cresta afilada 169
Vertedero de cresta afilada rectangular169
Evaluación del caudal en un vertedero
de cresta afilada rectangular
Vertedero Cipoletti
Evaluación de caudal en un vertedero Cipoletti
Límites de aplicación del vertedero Cipoletti
Localización y construcción del vertedero de cresta afilada
Anexo B.4 Canaletas de profundidad crítica
Anexo B.5 Características hidráulicas del orificio sumergido en canales abiertos
Anexo B.6  Método de las coordenadas para el aforo en tuberías

# ANEXO A.1

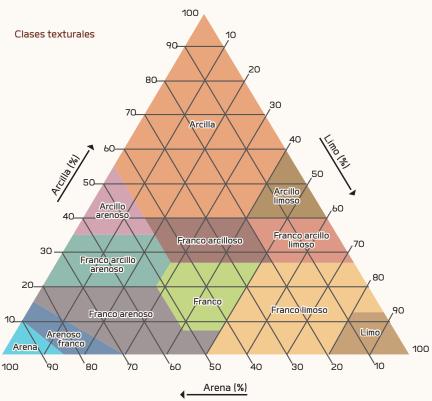
# **DETERMINACIÓN AL TACTO** DE LA TEXTURA DEL SUELO

La textura del suelo se define como la proporción de los separados del suelo (arenas, limos y arcillas). Esta propiedad se puede identificar al tacto tomando una muestra de 25 gramos aproximadamente, que se humedece (si está seca) con el fin de romper los agregados. Luego se amasa entre los dedos pulgar e índice, y con la ayuda del triángulo de texturas (Figura A.1.1), se clasifica según las siguientes condiciones:

- Arenoso: se siente áspero al friccionarlo y no forma una esfera cuando se amasa.
- Arenoso franco: forma una esfera, pero no permite formar una cinta o cilindro cuando se desliza o empuja con el pulgar.
- **Franco-arenoso**: forma una cinta débil de menos de 2.5 cm de largo y se siente áspera al tacto cuando se fricciona; se estima

- que la proporción de arena es > 50% y la de limo < 50% o menos.
- Franco-limoso: se forma una cinta débil de menos de 2.5 cm de largo y se siente muy suave; se estima que tiene más de 50% de limo y menos de 50% de arena.
- Franco: no predomina lo áspero ni lo suave, pero tiene mayor proporción de arena que de limo.
- Limoso: la cinta débil que se forma se siente muy suave, como talco, con más de 80% de limo.
- Franco-arcillo-arenoso: se forma una cinta entre 2.5 cm y 5 cm de largo antes de que se rompa. El suelo se siente muy áspero y el porcentaje de arena estimado es > 50% y el de arcilla es < 30%.

Figura A.1.1 Triángulo utilizado para identificar la textura del suelo directamente en campo.



La clase textural de un suelo se determina en la intersección de dos de las tres líneas que se trazan a partir del porcentaje de cada tipo de partícula, como ilustra el ejemplo: Limo 20% Arcilla 50%

> Arena 30%

Suelo arcilloso

Fuente: Adaptado de Cruz (2014).

- Franco-arcillo-limoso: la cinta de suelo de 2.5 cm a 5 cm de largo se siente muy suave, con más limo y arcilla que arena.
- Franco-arcilloso: no predomina lo áspero ni lo suave y tiene un poco más de arcilla que de arena y limo.
- Arcillo-arenoso: forma una cinta de más de 5 cm de largo antes de que se rompa, pero el suelo es muy áspero, con más del 50% de arena y entre 40% y 50% de arcilla.
- Arcillo-limoso: el suelo se siente muy suave, con una proporción estimada de limo y arcilla entre 40% y 60%.
- Arcilloso: no predomina ni lo áspero ni lo suave. El contenido de arcilla es > 40% y el de arena < 40%.



Determinación de la textura al tacto.

# ANFXO A.2

# MÉTODOS PARA MEDIR LA INFILTRACIÓN

Para medir la infiltración de agua en el suelo existen varios métodos, entre ellos, el de los anillos infiltrómetros, el infiltrómetro de disco, el de entrada y salida de aqua en un surco, el de avance del aqua en surcos y el de surco bloqueado. A continuación, se describen los métodos de anillos infiltrómetros y el de entrada y salida de agua en un surco.

### MÉTODO DE LOS ANILLOS INFILTRÓMETROS

Es el más común para determinar la velocidad de infiltración de aqua en el suelo. Se recomienda en el diseño de sistemas de riego por aspersión, goteo y melgas. Fue descrito en detalle por Haise et al. (1956), y consiste en enterrar en el suelo dos cilindros metálicos: el interior con diámetro entre 20 cm y 40 cm, y una altura de 30 cm a 40 cm; el exterior con diámetro entre 50 cm y 60 cm, y una altura de 30 cm (Figura A.1.2).

#### Figura A.1.2 Anillos infiltrómetros para determinar la velocidad de infiltración con fines de diseño de sistemas de riego por aspersión, goteo y melgas.





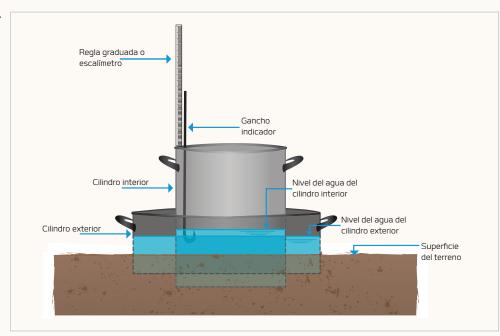
# PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA INFILTRACIÓN UTILIZANDO LOS ANILLOS INFILTRÓMETROS

A continuación, se describe el procedimiento propuesto por Grillo (1975) y Tafur (1984) para determinar la infiltración utilizando cilindros infiltrómetros:

- 1. Seleccione el sitio donde se va a realizar la prueba, con el fin de que sea representativo del área que requiere la información sobre la infiltración. El lugar donde se van a instalar los anillos infiltrómetros debe estar no solo distante de caminos, vías y canales, que puedan alterar los valores de infiltración, sino también limpio de materiales como malezas y piedras. Adicionalmente, se debe tener cuidado de no alterar la superficie del suelo.
- 2. Introduzca el cilindro exterior a 10 cm de profundidad en el suelo, y luego el cilindro interior a 15 cm, de tal forma que queden concéntricos. Se debe tener especial cuidado en su introducción para que la penetración de los anillos sea vertical y no se disturbe el suelo. Además, las paredes de estos deben quedar en total contacto con el suelo para evitar filtraciones laterales que provoquen la sobreestimación de los valores de infiltración (Figura A.1.3).

- 3. Coloque un plástico dentro del cilindro interior para que reciba el aqua y así evitar que se altere la superficie del suelo.
- 4. Llene el cilindro interior con agua hasta una altura que le permita hacer las lecturas con facilidad, dejando un borde libre de 5 cm. Luego llene con agua el cilindro exterior hasta una altura entre 10 cm y 15 cm, lo cual garantiza que la infiltración en el cilindro interior sea vertical.
- 5. Inmediatamente, se vierte el agua al cilindro exterior y se retira con cuidado el plástico que contiene el agua del cilindro interior, para que el proceso de infiltración comience simultáneamente en ambos cilindros.
- 6. Una vez se retira el plástico del cilindro interior, se debe leer la posición del agua en este cilindro, utilizando una regla graduada o una regla escala colocada en el borde y un gancho indicador u otro elemento que permita hacer lo mismo, es decir, conocer el nivel de agua al comienzo de la prueba (tiempo cero). Para lograr lo anterior, se toma el gancho indicador y con la punta de su extremo inferior se rompe la superficie del agua (Figura A.1.3).

Figura A.1.3 Esquema de instalación de los cilindros infiltrómetros fijados en el suelo con el detalle de la regla y el gancho para medir el nivel del agua en el cilindro interior.



Fuente: Adaptado de Tafur (1984).

A continuación, se debe anotar el valor observado en la regla que señala el extremo superior del gancho.

Tras cumplirse el tiempo fijado, que al comienzo puede ser de 2 minutos, 5 minutos o más, se repite el procedimiento con el gancho y la regla para conocer cuánto ha descendido el agua con respecto a la lectura anterior, es decir, la diferencia de lecturas será la infiltración de agua en el intervalo de tiempo escogido. Si la infiltración de agua en un suelo es muy rápida, se puede fijar la altura y medir el tiempo de descenso de la misma, lo cual no afectará los cálculos. Este proceso de lectura se repite varias veces modificando poco a poco el intervalo de tiempo entre lecturas, según la conveniencia; por ejemplo, si se comienza con 5 minutos, después de tres o cuatro lecturas sucesivas, se porá ampliar el intervalo de tiempo a 10 o 15 minutos.

- 7. Es importante señalar que cada vez que el nivel de agua descienda hasta un punto en el cual se dificulta la lectura en la regla, es necesario recuperar el nivel agregando más agua, pero de manera rápida, sin perder tiempo.
  - Antes de agregar el agua, se debe anotar el valor donde está el nivel; después de vertida, se debe anotar el valor donde quedó, de tal forma que sea posible calcular la cantidad que se infiltró en ese intervalo. Así mismo, se debe mantener el nivel del agua en el cilindro exterior.
- 8. Cuando se obtengan los datos de tiempo parcial y lámina infiltrada parcial, se procede a calcular el tiempo acumulado en minutos y la lámina infiltrada acumulada en milímetros, correspondiente a cada valor de tiempo. Con esta información, se determina la función potencial de infiltración acumulada, expresada en términos de lámina de agua, y, a partir de esta, la función de velocidad de infiltración, tal como se muestra en el siguiente ejemplo.

#### **EJEMPLO**

#### Medición de la infiltración con cilindros infiltrómetros

En una prueba de este tipo, se obtuvo la información que se incluye en el Cuadro A.1.1. Con estos datos, se calcula el tiempo acumulado en minutos y la lámina infiltrada acumulada en milímetros, correspondiente a cada valor de tiempo (Cuadro A.1.2).

La función de infiltración acumulada se ajusta al modelo matemático de tipo potencial de Kostiakov (Smith y Warrick, 2007), así:

$$I = a * t^b$$

#### Donde:

- *I*: infiltración acumulada (cm o mm)
- t: tiempo acumulado (min)
- a: coeficiente de la función de infiltración
- b: exponente del tiempo acumulado

La representación de los datos de infiltración acumulada vs. el tiempo acumulado (Figura A.1.4) es expresada por la regresión potencial de la siguiente manera:

$$I = 7.8063t^{0.5587}$$

Cuadro A.1.1
Resultados
obtenidos en
una prueba
de infiltración
con cilindros
infiltrómetros.

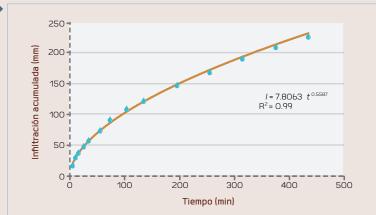
Tiempo parcial (min)	Lámina infiltrada parcial (mm)	Tiempo parcial (min)	Lámina infiltrada parcial (mm)
5	18	30	18
5	11	30	15
5	7	60	26
10	12	60	23
10	9	60	21
20	17	60	19
20	15	60	18
F . T . (1004)			

Fuente: Tafur (1984).

Cuadro A.1.2 Valores de	Tiempo parcial (min)	Lámina infiltrada parcial (mm)	Tiempo acumulado (min)	Infiltración acumulada (mm)
tiempo acumu- lado y lámi-	5	18	5	18
na infiltrada	5	11	10	29 = 18 + 11*
acumulada	5	7	15	36 = 29 + 7
para determi- nar la ecuación	10	12	25	48 = 36 + 12
de infiltración	10	9	35	57 = 48 + 9
acumulada.	20	17	55	74 = 57 + 17
	20	15	75	89 = 74 + 15
	30	18	105	107 = 89 + 18
	30	15	135	122 = 107 + 15
	60	26	195	148 = 122 + 26
	60	23	255	171 = 148 + 23
	60	21	315	192 = 171 + 21
	60	19	375	211 = 192 + 19
	60	18	435	229 = 211 + 18

<sup>\*</sup> Al valor anterior de infiltración acumulada anterior se le suma el valor de la lámina de infiltración parcial. Fuente: Tafur (1984).





Fuente: Adaptado de Tafur (1984).

A continuación, se procede a calcular la función de la velocidad de infiltración (v<sub>i</sub> en mm/h), mediante la derivada de la ecuación de infiltración acumulada en función del tiempo (dI/dt), así:

$$v_i = \frac{dI}{dt} = \frac{d(7.8063 \ t^{0.5587})}{dt} = 0.5587 * 7.8063 * t^{(0.5587-1)} = 4.36 \ t^{-0.4413}$$



### Medición de la infiltración con cilindros infiltrómetros en un suelo representativo de nuestra región

En una prueba de infiltración con anillos en un suelo franco arcilloso localizado en el valle del río Cauca, se registraron los datos que aparecen en el Cuadro A.1.3.

Con los valores de tiempo e infiltración acumulados, se realizó una regresión potencial en el programa Excel®, con el fin de ajustar los datos al modelo potencial de Kostiakov y generar la ecuación de infiltración

acumulada (I) en función del tiempo (Figura A.1.5). Se debe tener presente que no se toman en cuenta los valores cero de la primera fila ya que no son aceptados en la regresión.

La función de infiltración acumulada resultante es:

$$I = a * t^b$$
$$I = 0.6082 * t^{0.6143}$$

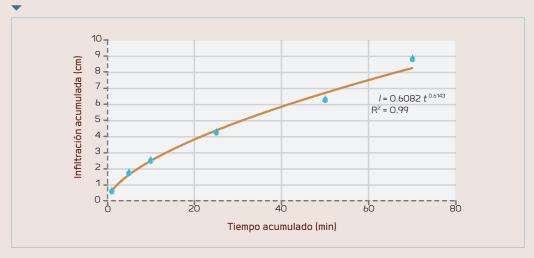
Cuadro A.1.3

Datos obtenidos en una prueba de infiltración con anillos en un suelo franco arcilloso.

Hora de lectura	Lectura de la lámina de agua (cm)	Tiempo entre lecturas <sup>b</sup> (min)	Diferencia entre lecturas de lámina (cm)	Tiempo acumulado <sup>c</sup> (t) (min)	Infiltración acumulada (/) (cm)
9:00	15.0	0	0	0	0
9:01	14.4	1	0.6	1	0.6
9:05	13.3	4	1.1	5	1.7
9:10	12.5	5	0.8	10	2.5
9:25	10.7/16.0 <sup>a</sup>	15	1.8	25	4.3
9:50	14.0	25	2.0	50	6.3
10:10	11.5	20	2.5	70	8.8

a. 10.7/16.0 significa que cuando se leyó el valor de 10.7, se tuvo que agregar agua al cilindro interior y el nuevo nivel de agua quedó en 16.0.

**Figura A.1.5**Infiltración acumulada determinada mediante regresión potencial *vs.* tiempo acumulado.



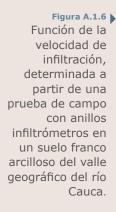
b. Valores de tiempo entre lecturas de la columna 1.

c. Tiempo transcurrido desde el comienzo de la prueba en minutos.

A partir de la ecuación de infiltración acumulada encontrada en la prueba de campo, se puede obtener la velocidad de infiltración o tasa de infiltración ( $v_i$ ) como la derivada o pendiente de la infiltración acumulada, así:

$$v_i = dI / dt = b * a * t^{b-1}$$
  
 $v_i = 0.6143 * 0.6082 * t^{0.6143 - 1}$   
 $v_i = 0.3736 * t^{-0.3857}$ 

La función de la velocidad de infiltración se incluye en la Figura A.1.6 como una regresión potencial con respecto al tiempo acumulado. Se observa que la velocidad  $(v_i)$ tiende hacia un constante conocido como velocidad de infiltración básica  $(v_{ib})$ , muy importante en el diseño de sistemas de riego, y que se presenta teóricamente cuando el tiempo de contacto entre agua y suelo en el proceso de infiltración es alto (entre 1 y 2 horas, en la mayoría de los casos).





# USO DE LA VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN EN EL DISEÑO DE RIEGO POR ASPERSIÓN

Para riego por aspersión, la intensidad de aplicación de agua (mm/h) debe ser seleccionada de tal manera que no exceda la velocidad de infiltración que corresponde a la lámina de riego neta requerida, con el fin de que no se presenten pérdidas de agua por escorrentía. El valor de esta intensidad se puede calcular utilizando las funciones de infiltración acumulada y velocidad de infiltración, siguiendo este procedimiento:

- 1. Se determina la lámina de riego neta requerida; por ejemplo, 50 mm (5 cm).
- 2. A partir de la curva de infiltración acumulada y con el valor de la lámina de riego neta en centímetros, se obtiene el valor del tiempo de infiltración acumulado. Como se observa en la

- Figura A.1.5, el valor encontrado es de 31 min, aproximadamente. Este tiempo también se puede obtener de manera precisa con la ecuación de la función de infiltración acumulada. En este caso, se confirma que el valor del tiempo acumulado es de 31 minutos.
- 3. Utilizando la curva de velocidad de infiltración y con el valor del tiempo acumulado requerido (31 min), se encuentra el valor de la velocidad de infiltración, el cual corresponde al valor de la intensidad máxima de aplicación. Siguiendo con el ejemplo, en la curva de la Figura A.1.6, con el valor del tiempo acumulado de 31 minutos, se obtiene el valor de la intensidad máxima de aplicación de agua de 0.1 cm/min, equivalente a 60 mm/h.

### MÉTODO DEL CAUDAL DE ENTRADA Y SALIDA EN UN SURCO PARA MEDIR LA INFILTRACIÓN

Es un método recomendado para determinar la función de la velocidad de infiltración en el suelo, así como la función de infiltración acumulada, las cuales son utilizadas en el diseño de riego por surcos.

# PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA INFILTRACIÓN USANDO EL MÉTODO DEL CAUDAL DE ENTRADA Y SALIDA EN UN SURCO

A continuación, se presenta el procedimiento para determinar la función de infiltración de agua en el suelo, utilizando el método de entrada y salida del flujo de agua descrito por Grillo (1975) y Tafur (1984).

- 1. Se seleccionan tres surcos adyacentes, que sean representativos del suelo y la pendiente del lote o suerte. En caso de que no haya surcos adyacentes, es necesario construirlos de tal forma que no ocurra desborde de agua entre ellos.
- 2. Si el suelo es poco permeable (por ejemplo: arcilloso), en la cabecera y a 60 metros hacia adelante del surco central, se deberán colocar aforadores. En suelos muy permeables, la distancia entre aforadores debe ser de 30 metros.
- 3. Una vez instalados ambos aforadores, se debe verter agua en cada uno de los surcos. El caudal por surco se estima como el valor máximo (Qmáx) que puede soportar sin que se presente erosión del suelo, así:

$$Qm\acute{a}x = \frac{0.63}{S}$$

#### Donde:

- Qmáx: caudal máximo (l/s)
- S: pendiente del surco (%)
- 4. Se debe procurar que durante el tiempo de prueba, el caudal que entra a los surcos sea constante, para lo cual se usan sifones o tubería con compuertas.

- 5. Cuando el agua alcance la mitad de la distancia que separa ambos aforadores, es necesario comenzar a cronometrar el tiempo. Se debe permitir que el agua empiece a pasar por el aforador de salida, y, cuando sea posible, leer un valor de caudal en este aforador, se debe anotar y simultáneamente registrar la lectura del aforador de entrada. Estas observaciones se acompañan del registro del tiempo transcurrido desde que el agua alcanzó la mitad de la distancia que separa ambos aforadores.
- 6. Continuar las lecturas de caudal en ambos aforadores al mismo tiempo, por ejemplo, si se comienza con lecturas cada 5 minutos. Después de tres o cuatro lecturas sucesivas, se puede ampliar el intervalo a 10 minutos por dos o tres lecturas sucesivas antes de un nuevo intervalo de 15 o 20 minutos, por un número de lecturas igual a las anteriores. De esta forma, se seguirá aumentando el intervalo hasta que se observe que el valor del caudal en el aforador de salida no está creciendo, o lo hace pero muy leve. Es importante recalcar que el caudal en el aforador de entrada debe permanecer constante durante el ensayo.
- 7. Una vez se consiga la información de la prueba, se pueden manejar los datos de manera tal que se obtenga la ecuación de velocidad de infiltración instantánea, como se muestra en el siguiente ejemplo.

# **EJEMPLO**

### Cálculo de infiltración utilizando el método de caudal de entrada y salida en surco

En el Cuadro A.1.4, se incluyen los resultados de un ensayo de infiltración por surcos, donde aparecen los caudales de entrada y salida, y el caudal infiltrado en una longitud de surco de 30 metros. Con base en estos datos, se calcula la velocidad de infiltración como:

$$v_i = \frac{q_i}{A}$$

#### Donde:

- *v<sub>i</sub>*: velocidad de infiltración (mm/h).
- qi: caudal infiltrado (l/s) en el tramo de prueba. En el ejemplo es de 30 metros.

• A: área humedecida por el surco (m<sup>2</sup>) = 30 m \*E (m), siendo E el espaciamiento entre surcos que transportan agua.

$$v_i = \frac{q_i \left(\frac{1}{s} * \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}}\right)}{(30 \text{ m} * E)} = q_i * \frac{120}{E}$$

Con los valores de tiempo acumulado y velocidad de infiltración en el mismo cuadro, se realiza una regresión potencial para generar la ecuación de velocidad de infiltración ( $v_i$ ) en función del tiempo (Figura A.1.7). La función de velocidad de infiltración resultante en este caso es:

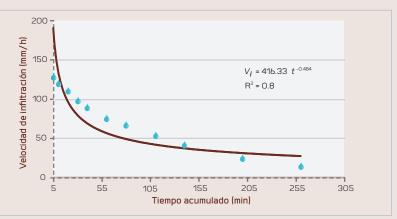
$$v_i = 416.33 t^{-0.484}$$

Cuadro A.1.4 Resultado de una prueba de infiltración en surcos utilizando el método de caudal de entrada y salida.

Tiempo acumulado ( <i>t</i> ) (min)	Caudal de entrada (q <sub>e</sub> ) (I/s)	Caudal de salida ( <i>q<sub>s</sub></i> ) (I/s)	Caudal infiltrado (q <sub>i</sub> ) en 30 m (I/s)	Velocidad de infiltración (v <sub>i</sub> ) (mm/h)
5	1	0.153	0.847	127.05
10	1	0.202	0.798	119.70
20	1	0.265	0.735	110.25
30	1	0.350	0.650	97.50
40	1	0.412	0.588	88.20
60	1	0.502	0.498	74.70
80	1	0.557	0.443	66.45
110	1	0.649	0.351	52.65
140	1	0.730	0.270	40.50
200	1	0.824	0.176	26.40
260	1	0.899	0.101	15.15

Fuente: Tafur (1984).

Figura A.1.7 Velocidad de infiltración en función del tiempo acumulado. Valores ajustados mediante regresión de potencia.



Fuente: Adaptado de Tafur (1984).

# ANEXO A.3

# LÁMINA DE AGUA RÁPIDAMENTE APROVECHABLE (LARA)

# DE LOS SUELOS DEL VALLE GEOGRÁFICO DEL RÍO CAUCA

#### Cuadro A.3.1 ▼

Lámina de agua rápidamente aprovechable (LARA) estimada para 179 suelos (213,675 ha con caña de azúcar) representativos del valle geográfico del río Cauca.

			LARA	(mm) <sup>a</sup>			LARA	(mm) <sup>a</sup>	
~			2-4 meses	4-10 meses	~			2-4 meses	4-10 meses
Símbolo	Nombre	Subgrupo de suelo	(O.6 m)		Símbolo	Nombre	Subgrupo de suelo	(O.6 m)	(O.8 m)
AF	Alto Miraflores	Udic Haplustolls	29	55	HE	Hacienda El Rhin	Fluventic Endoaquepts	58	82
AG	Aranjuez	Entic Endoaquerts	57	82	HR	Hormiguero	Udifluventic Haplustepts	48	67
AL	Alfaguara	Udic Haplustepts	51	64	HV	Hacienda Villas	Aquertic Eutrudepts	63	76
AM	Amaime	Typic Ustifluvents	48	74	ΙE	Inés	(Udic) Pachic Haplustolls	65	89
AR	Argelia	Vertic Argiustolls	50	60	IG			57	76
AS	Asombro	Udertic Haplustalfs	50	74	IN	Ingenio India	Aquic Haplustepts	55	70
AY	Arroyo	Udertic Haplustolls	49	76			Udic Haplustepts		
BA	Basuro	Aeric Endoaquepts	58	74	IS	Isabela	Aquertic Haplustolls	58	75
BB	Brisas	Aquic Haplustepts	58	83	IT	Italia	Typic Argiustolls	48	67
ВС	Baltica	Aquic Argiustolls	48	58	JA	Jamaica	Fluventic Haplustepts	64	85
ВН	Bahía	Fluventic Eutrudepts	52	78	JE	Jerusalén	Entic Udic Haplusterts	55	61
BL	Ballesteros	Typic Endoaquerts	58	72	JG	Japiogrande	Fluventic Eutrudepts	67	86
BR	Britania	Typic Haplustolls	53	72	JJ	Japiodos	Fluvaquentic Endoaquepts	55	82
ВТ	Balta	Aguertic Haplustolls	50	83	JN	Juanchito	Vertic Endoaquepts	54	67
BU	Burrigá	Typic Endoaquerts	56	78	JO	Joya	Fluventic Haplustepts	55	74
CA	Catorce	Aeric Endoaquerts	52	81	CU	Cuprecia	Aquic Hapluderts	51	91
СВ	Ceibal	Udertic Haplustalfs	50	74	DD	Diana	Typic Argiustolls	39	47
CC	Cachimbalito	Fluventic Hapludolls	59	78	DL	Delicias	Udic Haplustepts	57	75
CD	Chontaduro	Typic Haplustolls	55	72	DP	Delpalo	Udifluventic Haplustepts	51	67
CE	Cerrito	Entic Haplustolls	36	48	DS	Desbaratado	Aquertic Haplustolls	50	86
CH	Chundular	Entic Haplustolls	43	56	EB	El Blancal	Udic Haplustolls	51	81
CI	Cali		43		EE	Esperanza	Fluventic Haplustolls	49	72
		Cumulic Haplustolls		61	EG	Egipto	Chromic Vertic Endoaqualfs	65	78
CK	Coke	Fluventic Haplustepts	45	65	EG	Egipto	Chromic Vertic Endoaqualfs	65	78
CL	Canelo	Fluvaquentic Endoaquepts	60	80	EL	Escalita	Fluventic Haplustolls	52	79
CM	Chamburo	Fluvaquentic Haplustolls	52	77	EG	Egipto	Chromic Vertic Endoaqualfs	65	78
CN	Cantarina	Pachic Vertic Haplustolls	58	80	GH	Guachal	Pachic Haplustolls	52	72
CO	Corozo	Fluventic Eutrudepts	62	81	GI	Guacarí	Fluventic Haplustolls	52	74
CT	Corintias	Typic Haplusterts	55	79	GL	Galpón	Typic Calciusterts	54	71
FR	Franciscano	Aquic Haplustolls	49	64	ES	Esneda	Typic Haplusterts	50	70
GA	Guachené	Humic Dystrudepts	55	77	EZ	Escocia	Fluvaquentic Haplustolls	58	79
GB	Guabito	Aquic Haplustepts	56	64	FF	Río Fraile	Fluvaquentic Endoaquolls	43	67
GD	Guadual	Fluvaquentic Haplustolls	51	71	FL	Florida	Entic Haplustolls	37	50
GN	Génova	Entic Haplustolls	30	38	FO	La Floresta	Vertic Endoaquepts	69	90
GO	Guabal	Vertic Haplustepts	50	60	FP	Felipeto	Aquic Argiudolls	61	81
GR	Granadita	Ustic Haplohumults	43	52	LC	La Cabaña	· -	53	70
GU	Guadualito	Fluvaquentic Haplustolls	55	75	LG		Typic Calciustolls		70
GV	Genovés	Pachic Haplustolls	46	66		Laguneta	Vertic Endoaquolls	46	
GY	Guayabo	Fluventic Eutrudepts	69	84	LH	La Habana	Udic Haplustepts	56	75
НС	Ciénaga Honda	Fluvaquentic Endoaquepts	54	71	LI	Lisboa	Cromic Haplusterts	59	66

			LARA	A (mm) <sup>a</sup>				LARA	A (mm) <sup>a</sup>
			2-4	4-10	<b></b> .			2-4	4-10
Símbolo	Nombre	Subgrupo de suelo	meses (O.6 m)	meses (O.8 m)	Símbolo	Nombre	Subgrupo de suelo	meses (O.6 m)	meses (O.8 m)
LL	La Luisa	Sodic Endoaquerts	65	75	KP	Campiña	Fluventic Eutrudepts	60	80
LM	Loma	Vertic Hapludalfs	45	70	PH	Pasoancho	Pachic Haplustolls	39	51
LO	Lomitas	Fluvaquentic Endoaquepts	48	62	PI	Piedras	Chromic Haplusterts	51	71
LR	La Flor	Typic Endoaquepts	54	82	PK	Potoco	Typic Fluvaquents	76	109
LS	La Selva	Vertic Haplustolls	49	75	PL	Palmira	Pachic Haplustolls	50	70
MA	Margarita	Vertic Haplustepts	56	78	PM	Palmeras	Vertic Haplustolls	53	76
MC	Margarita Cruz	Typic Ustipsamments	17	23	PN PO	Pindo Potrerillo	Vertic Argiustolls Chromic Hapluderts	58 52	80 80
MF	Miraflores	(Ustic) Palehumults	51	61	PP	Palmas	Fluventic Haplustolls	35	40
MI	Micoarmel	Udifluventic Haplustepts	51	72	PR	Párraga	Fluventic Haplustolls	58	69
MJ	Machín	Fluventic Dystrudepts	55	73	PT	Palmirita	Cumulic Haplustolls	50	70
JP	Josepilla	Fluventic Haplustepts	53	76	PI		Cultiulic Hapiustolis	50	70
JR	Jordán	Typic Haplustolls	49	88	PW	Puente Esclavos	(Udic) Humic Dystrustepts	53	82
JU	Jamundí	Chromic Epiaquerts	64	91	PX	Palmito	(Udic) Pachic Haplustolls	61	72
	Cañas		55	72				49	80
KA		Fluventic Eutrudepts			QM	Quinamayó	Fluvaquentic Eutrudepts		
KB	Cabal	Aeric Fluvaquents	54	69	RF	Refugio	Entic Haplusterts	57	76
KC	Caloto	Typic Palehumults	52	75	RI	Retiro	Petrocalcic Haplusterts	65	81
KG	Cartaguito	Vertic Haplustalfs	50	60	SN	San Nicolás	Oxic Dystrudepts	58	79
KJ	Cascajal	Aeric Endoaquepts	49	87	SP	San Pablo	Typic Calciusterts	47	63
KK	Cachimbo	Udic Ustifluvents	43	63	SR	San Rafael	Entic Haplusterts	48	64
EL	Escalita	Fluventic Haplustolls	52	79	SS	San Lorenzo	Fluventic Haplustolls	55	85
EM	Esmeralda	Cumulic Haplustolls	55	69	ST	Santa Rita	Cumulic Haplustolls	45	67
EO	El Alto	(Ultic) Hapludalfs	32	41	SU	La Suiza	Vertic Endoaquolls	53	72
KS	Castillo	Udertic Haplustepts	52	71	TB	Tíbet	Chromic Endoaquerts	59	79
KT	Corinto	(Udic) Humic Dystrustepts	56	79	OV	Ovejera	Fluvaquentic Haplustolls	40	68
KZ	Corozal	Fluvaquentic Endoaquepts	48	77	PA	Palmiche	Pachic Haplustolls	54	72
LA	Limar	Fluventic Haplustepts	42	61	PB	Porce Blum	Fluventic Haplustolls	50	75
RJ	Río de Janeiro	Chromic Endoaquerts	50	66	PC	Pichichí	Vertic Argiustolls	41	62
RL	Río Paila	Fluventic Haplustolls	50	73	TE	Tesoro	Entic Haplustolls	44	64
RP	Rancho Pato	Chromic Hapluderts	57	82	TF	Tiftón	Vertic Eutrudepts	50	66
RR	Rita	Pachic Argiustolls	56	72	TI	Trinidad	Aquic Haplustepts	36	43
RS	Río Teta	Aguic Eutrudepts	52	74	TL	Taula	Udic Haplusterts	69	94
RT	Ricaurte	Vertic Haplustolls	50	75	TM	Timba	(Anthraguic) Dystrudepts	54	73
SA	Samán	Fluventic Haplustepts	47	87	TR	Troja	Udic Haplustolls	51	74
SC	San Camilo	Typic Haplusterts	47	70	TT	Tortugas	Aquertic Hapludalfs	52	84
SE	Santa Elena	Entic Haplustolls	55	78	TU	Tupia	Fluventic Haplustepts	44	73
SG	San Jorge	Aquic Eutrudepts	54	71	VB	Viterbo	Aquic Hapludolls	50	78
SH	Santa Rosa	Entic Haplusterts	56	75	VC	Victoria	Udertic Haplustepts	54	69
SK	Sinaí	Udic Haplustolls	56	86	VG	Vega	Typic Ustifluvents	48	83
SL SM	Sillero San Marcos	Typic Hapludalfs Fluventic Haplustepts	65 40	90 61	VH	Vista Hermosa	Aeric Endoaquerts	67	85
					VI	Villa	Typic Haplustepts	51	70
MK	Monaco	Typic Endoaquepts	57	85	VM	Villa Linda	Typic Hapludolls	60	86
ML	Manolo	Udifluventic Haplustolls	47	63	VP	Villa Paz	Typic Udifluvents	58	80
MN	Manuelita	Fluventic Haplustolls	55	75	VF	Villa Stella	Typic Dystrudepts	54	73
MO	Morgan	Fluventic Haplustolls	45	58	YM	Yumbo	Vertic Haplustepts	45	60
MS	Marsella	Typic Haplustepts	48	73	1 141		vertic napiustepts	45	60
NA	Nariño	Typic Haplustolls	56	70	ZC	Zanjón Cochinito	Vertic Endoaquepts	61	84
NI	Nilo	Aquertic Hapludalfs	46	54		Zanjón			
NJ	Naranjos	Inceptic Haplustalfs	49	68	ZJ	Rosario	Vertic Endoaqualfs	55	84
NM	Nima	Entic Haplustolls	45	60		Zanjón de			
NP	Nuevo Pichichí	Typic Haplusterts	41	62	ZP	Piedra	Fluvaquentic Endoaquolls	59	79
OR	Oriente	Pachic Haplustolls	45	64	ZR	Zanjón Rozo	Fluvaquentic Endoaquepts	62	83
KL	Calamar	Vertic Argiustolls	42	65					
KM	Cámbulos	Udertic Haplustolls	59	78					
KN	Canaima	Typic Hapluderts	69	79					.,.
					Nota: E	stos vaiores no re	emplazan las <i>LARAS</i> determinadas <sub>l</sub>	para cada	SITIO.

# **ANEXO B.1**

# TABLA PARA LA CALIBRACIÓN DE CANALETAS SIN CUELLO EN CONDICIONES DE FLUJO LIBRE

Cuadro B.1.1 Tabla para calibración de canaleta sin cuello bajo condición de flujo libre,

expresada en ancho de cuello por longitud total  $(b_c * L)$ . CAUDAL Q (m³ por segundo)

ha	CAUDAL Q (m³ por segundo)								
(m)	10 x 90 cm	20 x 90 cm	30 x 90 cm	20 x 180 cm	40 x 180 cm	60 x 180 cm	30 x 270 cm	60 x 270 cm	100 x 270 cm
0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.002
0.015	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003
0.020	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.001	0.003	0.005
0.025	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003	0.002	0.004	0.007
0.030	0.001	0.001	0.002	0.001	0.003	0.005	0.003	0.005	0.009
0.035	0.001	0.002	0.002	0.002	0.004	0.006	0.003	0.007	0.011
0.040	0.001	0.002	0.003	0.002	0.005	0.007	0.004	0.008	0.014
0.045	0.001	0.003	0.004	0.003	0.006	0.009	0.005	0.010	0.017
0.050	0.001	0.003	0.004	0.003	0.007	0.011	0.006	0.012	0.020
0.055	0.002	0.004	0.005	0.004	0.008	0.012	0.007	0.014	0.023
0.060	0.002	0.004	0.006	0.005	0.009	0.014	0.008	0.016	0.026
0.065	0.002	0.005	0.007	0.005	0.011	0.016	0.009	0.018	0.030
0.070	0.003	0.006	0.008	0.006	0.012	0.018	0.010	0.020	0.034
0.075	0.003	0.006	0.009	0.007	0.014	0.021	0.011	0.022	0.038
0.080	0.003	0.007	0.011	0.007	0.015	0.023	0.012	0.025	0.042
0.085	0.004	0.008	0.012	0.008	0.017	0.025	0.013	0.027	0.046
0.090	0.004	0.009	0.013	0.009	0.018	0.028	0.015	0.030	0.050
0.095	0.005	0.010	0.014	0.010	0.020	0.030	0.016	0.032	0.054
0.100	0.005	0.011	0.016	0.011	0.022	0.033	0.017	0.035	0.059
0.105	0.006	0.012	0.017	0.012	0.024	0.036	0.018	0.038	0.063
0.110	0.006	0.013	0.019	0.013	0.026	0.039	0.020	0.040	0.068
0.115	0.007	0.014	0.021	0.013	0.027	0.042	0.021	0.043	0.073
0.120	0.007	0.015	0.022	0.014	0.029	0.045	0.023	0.046	0.078
0.125	0.008	0.016	0.024	0.015	0.032	0.048	0.024	0.049	0.083
0.130	0.008	0.018	0.026	0.016	0.034	0.051	0.026	0.052	0.089
0.135	0.009	0.019	0.028	0.018	0.036	0.054	0.027	0.056	0.094
0.140	0.010	0.020	0.030	0.019	0.038	0.057	0.029	0.059	0.099
0.145	0.010	0.022	0.031	0.020	0.040	0.061	0.031	0.062	0.105
0.150	0.011	0.023	0.034	0.021	0.043	0.064	0.032	0.066	0.111
0.155	0.012	0.024	0.036	0.022	0.045	0.068	0.034	0.069	0.117
0.160	0.012	0.026	0.038	0.023	0.047	0.072	0.036	0.073	0.122
0.165	0.013	0.027	0.040	0.024	0.050	0.075	0.037	0.076	0.129
0.170	0.014	0.029	0.042	0.026	0.052	0.079	0.039	0.080	0.135
0.175	0.014	0.031	0.045	0.027	0.055	0.083	0.041	0.083	0.141
0.180	0.015	0.032	0.047	0.028	0.058	0.087	0.043	0.087	0.147
0.185	0.016	0.034	0.049	0.030	0.060	0.091	0.045	0.091	0.154
0.190	0.017	0.036	0.052	0.031	0.063	0.095	0.047	0.095	0.160
0.195	0.018	0.037	0.054	0.032	0.066	0.099	0.049	0.099	0.167
0.200	0.018	0.039	0.057	0.034	0.068	0.104	0.051	0.103	0.174
0.205	0.019	0.041	0.060	0.035	0.071	0.108	0.052	0.107	0.180
0.210	0.020	0.043	0.062	0.036	0.074	0.112	0.055	0.111	0.187
0.215	0.021	0.045	0.065	0.038	0.077	0.117	0.057	0.115	0.194
0.220	0.022	0.047	0.068	0.039	0.080	0.121	0.059	0.119	0.201
0.225	0.023	0.049	0.071	0.041	0.083	0.126	0.061	0.123	0.209
0.230	0.024	0.051	0.074	0.042	0.086	0.130	0.063	0.128	0.216

ha: Carga hidráulica medida en la canaleta.

<b>b</b>	CAUDAL Q (m³ por segundo)								
h <sub>a</sub> (m)	10 x 90 cm	20 x 90 cm	30 x 90 cm	20 x 180 cm	40 x 180 cm	60 x 180 cm	30 x 270 cm	60 x 270 cm	100 x 270 cm
0.235	0.025	0.053	0.077	0.044	0.089	0.135	0.065	0.132	0.223
0.240	0.026	0.055	0.080	0.045	0.092	0.140	0.067	0.137	0.231
0.245	0.027	0.057	0.083	0.047	0.096	0.145	0.069	0.141	0.238
0.250	0.028	0.059	0.086	0.049	0.099	0.150	0.072	0.146	0.246
0.255	0.029	0.061	0.089	0.050	0.102	0.155	0.074	0.150	0.254
0.260	0.030	0.063	0.092	0.052	0.106	0.160	0.076	0.155	0.261
0.265	0.031	0.066	0.096	0.053	0.109	0.165	0.078	0.159	0.269
0.270	0.032	0.068	0.099	0.055	0.112	0.170	0.081	0.164	0.277
0.275	0.033	0.070	0.102	0.057	0.116	0.175	0.083	0.169	0.285
0.280	0.034	0.073	0.106	0.059	0.119	0.180	0.085	0.174	0.293
0.285	0.035	0.075	0.109	0.060	0.123	0.186	0.088	0.179	0.302
0.290	0.037	0.078	0.113	0.062	0.126	0.191	0.090	0.183	0.310
0.295	0.038	0.080	0.116	0.064	0.130	0.197	0.093	0.188	0.318
0.300	0.039	0.082	0.120	0.066	0.134	0.202	0.095	0.193	0.327
0.305	0.040	0.085	0.124	0.067	0.137	0.208	0.098	0.199	0.335
0.310	0.041	0.088	0.127	0.069	0.141	0.213	0.100	0.204	0.344
0.315	0.043	0.090	0.131	0.071	0.145	0.219	0.103	0.209	0.353
0.320	0.044	0.093	0.135	0.073	0.149	0.225	0.105	0.214	0.361
0.325	0.045	0.096	0.139	0.075	0.152	0.231	0.108	0.219	0.370
0.330	0.046	0.098	0.143	0.077	0.156	0.237	0.110	0.224	0.379
0.335	0.048	0.101	0.147	0.079	0.160	0.243	0.113	0.230	0.388
0.340	0.049	0.104	0.151	0.081	0.164	0.249	0.116	0.235	0.397
0.345	0.050	0.107	0.155	0.083	0.168	0.255	0.118	0.241	0.406
0.350	0.052	0.110	0.159	0.085	0.172	0.261	0.121	0.246	0.416
0.355	0.053	0.112	0.164	0.087	0.176	0.267	0.124	0.252	0.425
0.360	0.054	0.115	0.168	0.089	0.180	0.273	0.126	0.257	0.434
0.365	0.056	0.118	0.172	0.091	0.185	0.279	0.129	0.263	0.444
0.370	0.057	0.121	0.177	0.093	0.189	0.286	0.132	0.268	0.453
0.375	0.059	0.124	0.181	0.095	0.193	0.292	0.135	0.274	0.463
0.380	0.060	0.127	0.185	0.097	0.197	0.299	0.138	0.280	0.473
0.385	0.062	0.131	0.190	0.099	0.202	0.305	0.140	0.286	0.482
0.390	0.063	0.134	0.195	0.101	0.206	0.312	0.143	0.291	0.492
0.395	0.065	0.137	0.199	0.103	0.210	0.318	0.146	0.297	0.502
0.400	0.066	0.140	0.204	0.105	0.215	0.325	0.149	0.303	0.512
0.405	0.068	0.143	0.209	0.108	0.219	0.332	0.152	0.309	0.522
0.410	0.069	0.147	0.213	0.110	0.224	0.339	0.155	0.315	0.532
0.415	0.071	0.150	0.218	0.112	0.228	0.345	0.158	0.321	0.542
0.420	0.072	0.153	0.223	0.114	0.233	0.352	0.161	0.327	0.552
0.425	0.074	0.157	0.228	0.116	0.237	0.359	0.164	0.333	0.563
0.430	0.076	0.160	0.233	0.119	0.242	0.366	0.167	0.339	0.573
0.435	0.077	0.163	0.238	0.121	0.247	0.373	0.170	0.346	0.584
0.440	0.079	0.167	0.243	0.123	0.251	0.380	0.173	0.352	0.594
0.445	0.080	0.170	0.248	0.126	0.256	0.388	0.176	0.358	0.605
0.450	0.082	0.174	0.253	0.128	0.261	0.395	0.179	0.364	0.615
0.455				0.130	0.266	0.402	0.182	0.371	0.626
0.460				0.133	0.270	0.409	0.185	0.377	0.637
0.465				0.135	0.275	0.417	0.189	0.383	0.648
0.470				0.138	0.280	0.424	0.192	0.390	0.659
0.475				0.140	0.285	0.432	0.195	0.396	0.669
0.480				0.142	0.290	0.439	0.198	0.403	0.681
0.485				0.145	0.295	0.447	0.201	0.409	0.692
0.490				0.147	0.300	0.454	0.205	0.416	0.703

				CAUDA	_ <i>Q</i> (m³ por	segundo)			
<i>h</i> a (m)	10 x 90 cm	20 x 90 cm	30 x 90 cm	20 x 180 cm	40 x 180 cm	60 x 180 cm	30 x 270 cm	60 x 270 cm	100 x 270 cm
0.495				0.150	0.305	0.462	0.208	0.423	0.714
0.500				0.152	0.310	0.470	0.211	0.429	0.725
0.505				0.155	0.315	0.477	0.214	0.436	0.737
0.510				0.157	0.321	0.485	0.218	0.443	0.748
0.515				0.160	0.326	0.493	0.221	0.450	0.760
0.520				0.162	0.331	0.501	0.224	0.457	0.771
0.525				0.165	0.336	0.509	0.228	0.463	0.783
0.530				0.168	0.342	0.517	0.231	0.470	0.794
0.535				0.170	0.347	0.525	0.235	0.477	0.806
0.540				0.173	0.352	0.533	0.238	0.484	0.818
0.545				0.176	0.358	0.541	0.242	0.491	0.830
0.550				0.178	0.363	0.550	0.245	0.498	0.842
0.555				0.181	0.369	0.558	0.249	0.505	0.854
0.560				0.184	0.374	0.566	0.252	0.513	0.866
0.565				0.186	0.380	0.575	0.256	0.520	0.878
0.570				0.189	0.385	0.583	0.259	0.527	0.890
0.575				0.192	0.391	0.591	0.263	0.534	0.902
0.580				0.195	0.391	0.600	0.266	0.541	0.902
0.585				0.197	0.402	0.609	0.270	0.549	0.927
0.590				0.200	0.408	0.617	0.270	0.556	0.939
0.595				0.203	0.414	0.626	0.273	0.563	0.952
0.600				0.206	0.419	0.635	0.277	0.571	0.964
				0.200	0.113	0.033			
0.605							0.284	0.578	0.977
0.610							0.288	0.586	0.989
0.615							0.292	0.593	1.002
0.620							0.295	0.601	1.015
0.625							0.299	0.608	1.028
0.630							0.303	0.616	1.040
0.635							0.307	0.624	1.053
0.640							0.310	0.631	1.066
0.645							0.314	0.639	1.079
0.650							0.318	0.647	1.092
0.655							0.322	0.655	1.106
0.660							0.326	0.662	1.119
0.665							0.330	0.670	1.132
0.670							0.333	0.678	1.145
0.675							0.337	0.686	1.159
0.680							0.341	0.694	1.172
0.685							0.345	0.702	1.186
0.690							0.349	0.710	1.199
0.695							0.353	0.718	1.213
0.700							0.357	0.726	1.226
0.705							0.361	0.734	1.240
0.710							0.365	0.742	1.254
0.715							0.369	0.750	1.268
0.720							0.373	0.759	1.281
0.725							0.377	0.767	1.295
0.730							0.381	0.775	1.309
0.735							0.385	0.784	1.323
0.740							0.389	0.792	1.337
0.745							0.393	0.800	1.352
	Kraatz y Mah	aian (1982)					0.398	0.009	1.366

Fuente: Kraatz y Mahajan (1982).

# ANEXO B.2

# PRINCIPIOS DE HIDRÁULICA PARA DISEÑO DE VERTEDEROS DE CRESTA LARGA

Un vertedero de cresta larga es una estructura que funciona a manera de resalto, cuya parte superior es horizontal. La estructura es instalada o construida en el fondo del canal para obstaculizar la corriente de agua y producir un flujo crítico, definido como aquel en el cual la energía específica presenta el valor mínimo para un caudal dado y un valor único de la profundidad de flujo, conocida como profundidad crítica  $(y_c)$ . El patrón de flujo con las variables hidráulicas de un vertedero de cresta larga aparece en la Figura B.2.1.

La energía específica se refiere a la energía por unidad de peso de agua en un canal y corresponde a la suma de la carga piezométrica (energía potencial) y la carga de velocidad (energía cinética). La carga de energía potencial (y) es igual a la carga de presión (P/pg) más la carga de posición (z), o sea que la carga de energía potencial (y) es igual a la profundidad o tirante del agua en el canal.

La carga de energía específica  $(H_0)$  se expresa como:

1. 
$$H_0 = y + \alpha \frac{v^2}{2g}$$

2. 
$$H_0 = y + \alpha \frac{(Q/A)^2}{2g}$$

3. 
$$H_0 = y + \alpha \frac{Q^2}{2q A^2}$$

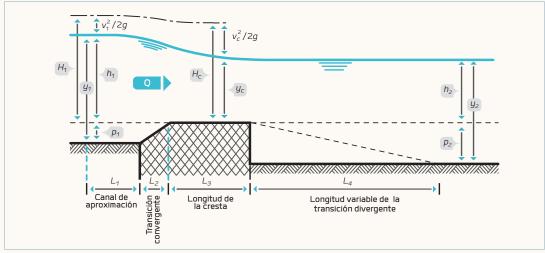
Donde A es el área de la sección transversal de flujo, la cual puede ser expresada como una función de la profundidad del agua.

La ecuación 3 indica que para una sección hidráulica dada y un caudal constante, la energía específica del agua en un canal abierto es función de la profundidad del agua (y).

La relación entre la energía específica mínima y la profundidad crítica se encuentra por medio de la derivada de la ecuación de carga de energía específica para un Q constante:

$$H_0 = y + \frac{\alpha Q^2}{2gA^2} = y + \frac{\alpha Q^2}{2g} * A^{-2}$$

Figura B.2.1 Patrón de flujo de agua sobre un vertedero de cresta larga.



Fuente: Adaptado de Bos (1989).

$$\frac{dH_0}{dy} = \frac{dy}{dy} - \alpha \left(\frac{Q^2}{gA^3}\right) \frac{dA}{dy}$$

$$\frac{dH_0}{dy} = 1 - \alpha \left(\frac{v^2}{gA}\right) \frac{dA}{dy}$$

Teniendo en cuenta que el diferencial de área dA = B \* dy, donde B es el ancho de dA.

$$\frac{dH_0}{dy} = 1 - \alpha \frac{v^2 B}{gA}$$

Si la energía específica es mínima:

$$\frac{dH_0}{dy} = 0$$

$$\propto \left(\frac{v_c^2}{2g}\right) = \frac{A_c}{2B_c}$$

El subíndice c denota fluio crítico.

Si el coeficiente de distribución de la velocidad ( $\alpha$ ) se asume como 1, el criterio para flujo crítico es:

$$\frac{{V_c}^2}{2q} = \left(\frac{1}{2}\right) \frac{A_c}{B_c}$$
 o sea que:

$$v = v_c = \left(\frac{gA_c}{B_c}\right)^{0.5}$$

La presencia de flujo crítico permite determinar el caudal a través de la medición del nivel de agua en el canal.

Si la estructura de medición fuese diseñada de tal forma que no se presenten pérdidas de energía aguas arriba y sobre la estructura misma, la carga de energía total de agua, de acuerdo con la ecuación de Bernoulli, es:

$$H_1 = h_1 + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = H = y + \frac{\alpha V^2}{2g}$$

Despejando la velocidad de flujo v:

$$V = [2g (H_1 - y)]^{0.5} * \alpha^{-0.5}$$

Donde H, es la carga de energía total aguas arriba de la estructura, medida con respecto a la cresta, como aparece en la Figura B.2.1.

Sustituyendo Q = v \* A y asumiendo  $\alpha = 1$ , la ecuación general de caudal se puede expresar así:

$$Q = A [2g (H_1 - y)]^{0.5}$$

Si ocurre flujo crítico en la sección de control  $(y = y_c)$ , se puede derivar una ecuación de carga-caudal para varias geometrías de cresta en el vertedero de cresta larga, a partir de la siguiente ecuación:

$$Q = A_c [2g (H_1 - y_c)]^{0.5}$$

Para una sección de control rectangular (Figura B.2.2), en la cual el flujo es crítico:

$$A_c = b_c * y_c$$
;  $b_c = B_c$  o sea que:
$$\frac{A_c}{B_c} = y_c$$

Por tanto, la ecuación general de flujo crítico (energía específica mínima) encontrada:

$$\frac{v_c^2}{2g} = \left(\frac{1}{2}\right) \frac{A_c}{B_c}$$

Puede ser representada como:

$$\frac{v_c^2}{2g} = \left(\frac{1}{2}\right) y_c$$

Además, la carga de energía total es:

$$H = y_c + \frac{{v_c}^2}{2q}$$

Reemplazando  $\frac{V_c^2}{2a}$  por  $\left(\frac{1}{2}\right)y_c$  y despejan-

do  $y_c$  se tiene:

$$y_c = \left(\frac{2}{3}\right) H = \left(\frac{2}{3}\right) H_1$$

Sustituyendo esta relación y la de  $A_c = b_c y_c$ en la ecuación de carga-caudal para vertederos de cresta larga, quedaría:

$$Q = A_c [2g (H_1 - y_c)]^{0.5}$$



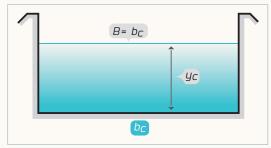


Figura B.2.3

Valores del coeficiente de descarga  $C_d$  en función de la relación entre la carga total de energía medida por encima de la cresta ( $H_1$  en m) y la longitud del cuello (L en m).

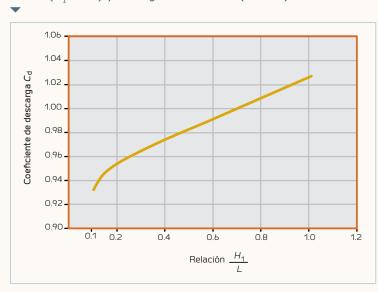
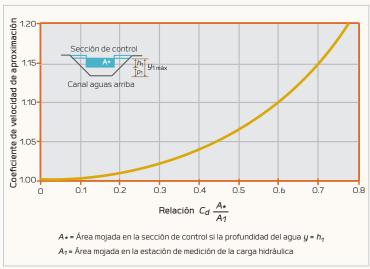


Figura B.2.4 Valores de  $C_v$  en función de la tasa de área  $C_d \frac{A*}{\Delta}$ para una sección de control rectangular.



Fuente: Adaptado de Bos (1989).

Y simplificando,

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right) \left(\frac{2g}{3}\right)^{0.5} * b_c * H_1^{1.5}$$

En este punto, es necesario introducir un coeficiente de descarga  $C_d$  como factor de corrección, debido a que, en la realidad, no se cumplen las condiciones ideales, tales como la ausencia de fuerzas centrípetas en el flujo aguas arriba y aguas abajo de la sección transversal, la ausencia de efectos de viscosidad y turbulencia, y la distribución de velocidad uniforme. El valor de  $C_d$  depende del tipo y la forma de la estructura de medición y se puede encontrar por medio de la Figura B.2.3.

$$Q = C_d \left( \frac{2}{3} \right) \left( \frac{2g}{3} \right)^{0.5} * b_c * H_1^{1.5}$$

Si se tiene en cuenta que en instalaciones en campo no es posible medir de forma directa la carga de energía  $H_1$ , y normalmente lo que se mide es el nivel de agua, aguas arriba de la estructura respecto a la cresta  $(h_1)$ , la ecuación anterior quedaría:

$$Q = C_d C_V \left( \frac{2}{3} \right) \left( \frac{2g}{3} \right)^{0.5} * b_c * h_1^{1.5}$$

Donde  $C_V$  es un factor de corrección debido a que se desprecia el valor de la carga de velocidad en la zona de aproximación del canal:  $\propto v^2 / 2g$ .

Los valores de  $C_V$  en función de la tasa de área  $C_d \frac{A^*}{A}$ , se incluyen en la Figura B.2.4 para una sección de control rectangular, siendo A\* el área mojada en la sección de control, si la profundidad del agua es  $y = h_1$ . Mientras tanto,  $A_1$  es el área mojada en la estación de medición de la carga hidráulica.

### ANEXO B.3

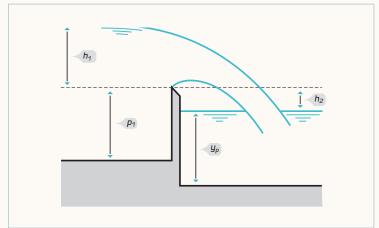
# DISEÑO Y CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS DE CRESTA AFILADA

Son estructuras en láminas delgadas, con una abertura en la parte superior cuyo espesor es de 2 mm o menos (Figura B.3.1), y que pueden ser de forma rectangular, triangular o trapezoidal.

Los vertederos de forma rectangular o triangular alcanzan una precisión de 98%, mientras que los trapezoidales alcanzan una precisión de 95%. Para obtener alta precisión, es necesario que el chorro de agua que pasa por la abertura tenga una adecuada ventilación para evitar que se produzca un vacío y cause una sobrevaloración del caudal. Estos vertederos se recomiendan cuando se requieren mediciones de alta precisión, por ejemplo, en laboratorios de hidráulica e industrias.

El nivel de agua después del vertedero debe ser de 5 cm o más por debajo del nivel de la cresta del vertedero  $(h_2)$ , lo que significa que la pérdida de carga requerida por un vertedero de este tipo excede en más de 5 cm la carga aguas arriba, respecto al nivel de la cresta, lo cual limita su uso en las condiciones de la zona plana del valle geográfico del río Cauca. Además, no son adecuados en corrientes que arrastran sedimentos que se depositan en el cauce de aproximación y limitan las condiciones para un aforo exacto.

Figura B.3.1 Perfil y parámetros hidráulicos de un vertedero de cresta afilada.



Fuente: Adaptado de Bos (1989).

El vertedero de cresta afilada debe provocar la contracción completa de la corriente de agua que pasa sobre la abertura, lo cual se logra cuando los taludes y el fondo del canal se encuentran a una distancia mínima de dos veces la carga sobre la cresta medida en la regla de medición.

#### Vertedero de cresta afilada rectangular

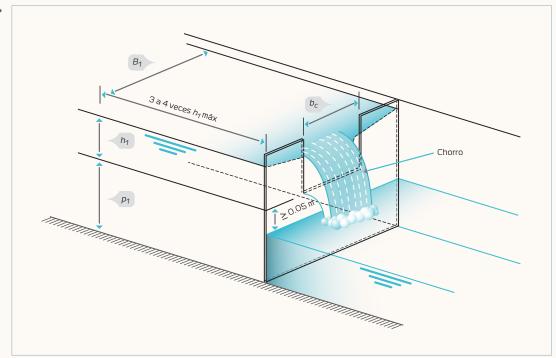
Como su nombre lo indica, este tipo de vertedero tiene una abertura rectangular y se puede localizar en canales cuya sección transversal sea rectangular o trapezoidal (Figura B.3.2). Si el canal de aproximación es suficientemente grande, esto es, si  $B_1(h_1 + p_1) \ge 10 b_c h_1$  para que la velocidad de aproximación sea mínima, y si, además, el vertedero forma una contracción completa, o sea que tanto las paredes como el fondo del canal quedan lejos de la cresta, la geometría del canal de aproximación no es importante. El vertedero de contracción completa se puede definir por los requerimientos en los parámetros  $B_1$  -  $b_c$ ,  $h_1/p_1$ ,  $h_1/b_c$ ,  $h_1$ ,  $b_c$  y  $p_1$ que aparecen en el Cuadro B.3.1.

Cuadro B.3.1 Requisitos de un vertedero de cresta afilada rectangular y de contracción completa.

•	
$B_1 - b_c$	≥ 4 h <sub>1</sub>
$h_1/p_1$	≤ 0.5
$h_1/b_c$	≤ 0.5
$0.07 \text{ m} \le h_1 < 0.60 \text{ m}$	
$b_c$	≥ 0.30 m
$p_{_1}$	≥ 0.30 m

Fuente: Bos (1989).

Figura B.3.2 Vertedero de cresta afilada y sección rectangular.



Fuente: Adaptado de Bos (1989).

### Evaluación del caudal en un vertedero de cresta afilada rectangular

La ecuación general de carga-caudal para un vertedero de cresta afilada rectangular es:

$$Q = C_e * \frac{2}{3} * (2g)^{0.5} * b_c * h_1^{1.5}$$

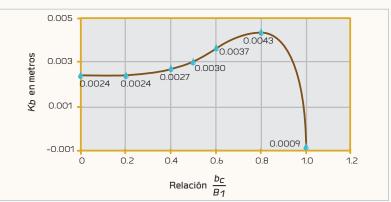
Para aplicar esta ecuación, Kindsvater y Carter (1957), citados por Bos (1989), propusieron la siguiente ecuación:

$$Q = C_e * \frac{2}{3} * (2g)^{0.5} * b_e * h_e^{1.5}$$

Donde  $\boldsymbol{b}_{e}$  es el ancho efectivo del vertede- $\begin{aligned} &\text{ro} = b_c + K_b \text{ y } h_e \text{ es la carga efectiva} = h_1 + K_h. \\ &\text{Los símbolos } K_b \text{ y } K_h \text{ representan los efectos} \end{aligned}$ combinados de varios fenómenos debidos a la viscosidad y la tensión superficial del agua. Para hallar  $K_b$  se puede utilizar la Figura B.3.3 en función de  $b_c/B_1$  y para  $K_h$  se usa el valor de 0.001 m.

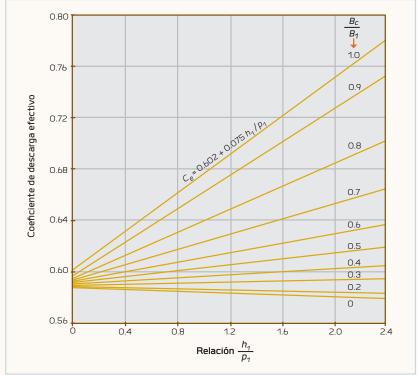
El coeficiente de descarga efectivo  $C_{\rho}$  se encuentra utilizando la Figura B.3.4.

Figura B.3.3 Valores de K, en función de  $b_c/B_1$  para determinar el caudal en un vertedero rectangular de cresta afilada.



Fuente: Adaptado de Bos (1989).

Figura B.3.4 Valores del coeficiente de descarga efectivo  $C_e$ , en función de las relaciones  $b_c/B_1$ , y  $h_1/p_1$  para la evaluación del caudal en un vertedero de cresta afilada rectangular.



Fuente: Adaptado de Bos (1989).

### Límites de aplicación

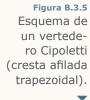
Como límites de aplicación del vertedero de cresta afilada, se pueden citar:

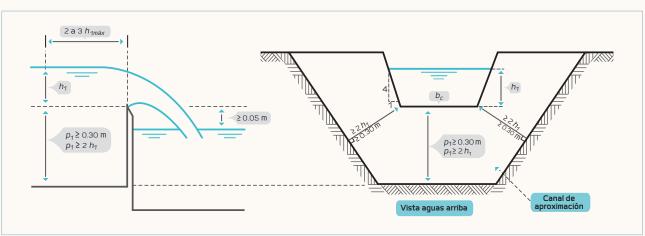
- **1.** El límite inferior práctico para  $h_1 = 0.03$  m.
- 2. El límite superior recomendado para  $h_1/p_1 = 2.0$ , mientras que  $p_1$  debe ser mínimo de 0.10 m.
- **3.** El ancho de la cresta  $b_c$  no debe ser menor a 0.15 m.

4. Para facilitar la aireación del chorro de agua, el nivel aguas abajo debe ser, por lo menos, de 0.05 m por debajo del nivel de la cresta.

#### Vertedero Cipoletti

Es un vertedero de cresta afilada con una sección de control trapezoidal, donde la cresta es horizontal y los lados presentan una pendiente con una inclinación de 1:4 (horizontal:vertical) (Figura B.3.5). Su precisión es de 95%.





Fuente: Adaptado de Bos (1989).

### Evaluación de caudal en un vertedero Cipoletti

La ecuación básica de carga-caudal para el vertedero Cipoletti es la misma que se utiliza en el caso de un vertedero de cresta larga rectangular de contracción completa:

$$Q = C_d C_v * \left(\frac{2}{3}\right) * \left(\frac{2g}{3}\right)^{0.5} * b_c * h_1^{1.5}$$

Donde el coeficiente de descarga  $C_d$  es igual a 0.63, mientras que el coeficiente de velocidad  $C_{\nu}$  se puede obtener a partir de la Figura B.3.4.

En el Cuadro B.3.2 se incluyen los valores de caudal Q en  $m^3/s$  por metro de ancho de cresta para vertedero Cipoletti.

Cuadro B.3.2 Caudal por metro de ancho de cresta (m³/s por metro) en un vertedero Cipoletti, en función de la carga hidráulica  $h_1$  (m).

CARGA HIDRÁULICA <i>h<sub>1</sub></i> (m)	CAUDAL (m³/s por metro)	CARGA HIDRÁULICA h <sub>1</sub> (m)	CAUDAL (m³/s por metro)	CARGA HIDRÁULICA <i>h</i> , (m)	CAUDAL (m³/s por metro)
0.06	0.0273	0.26	0.247	0.46	0.580
0.07	0.0344	0.27	0.261	0.47	0.599
0.08	0.0421	0.28	0.275	0.48	0.618
0.09	0.0502	0.29	0.290	0.49	0.638
0.10	0.0588	0.30	0.306	0.50	0.657
0.11	0.0678	0.31	0.321	0.51	0.677
0.12	0.0773	0.32	0.337	0.52	0.697
0.13	0.0871	0.33	0.352	0.53	0.717
0.14	0.0974	0.34	0.369	0.54	0.738
0.15	0.108	0.35	0.385	0.55	0.758
0.16	0.119	0.36	0.402	0.56	0.779
0.17	0.130	0.37	0.418	0.57	0.800
0.18	0.142	0.38	0.435	0.58	0.821
0.19	0.154	0.39	0.453	0.59	0.843
0.20	0.166	0.40	0.470	0.60	0.864
0.21	0.179	0.41	0.488		
0.22	0.192	0.42	0.506		
0.23	0.205	0.43	0.524		
0.24	0.219	0.44	0.543		
0.25	0.232	0.45	0.561	<i>C<sub>v</sub></i> ∼	1.00

Fuente: Bos (1989).

#### Límites de aplicación del vertedero Cipoletti

Entre las limitaciones de este vertedero, se pueden mencionar:

- 1. La altura de la cresta con respecto al fondo del canal de aproximación debe ser, al menos, dos veces la carga hidráulica sobre la cresta y el valor mínimo debe ser 0.30 m.
- La distancia desde los lados de la sección de control trapezoidal hasta los lados del canal de aproximación, igualmente, debe ser, por lo menos, dos veces la carga sobre la cresta con un valor mínimo de 0.30 m.
- 3. La carga hidráulica aguas arriba respecto a la cresta  $(h_1)$  no puede ser menor de 0.06 m ni mayor de 0.60 m.
- **4.** La relación  $h_1/b_c$  debe ser menor o igual a 0.5.
- 5. Para facilitar la aireación del chorro de agua que pasa por encima de la cresta, el nivel aguas abajo debe ser, al menos, de 0.05 m por debajo de la cresta.

#### Localización y construcción del vertedero de cresta afilada

Las condiciones generales que se deben tener presentes en la construcción o instalación de vertederos de cresta afilada con contracción completa del flujo de agua son las siguientes:

- 1. El vertedero debe ser colocado en ángulo recto respecto a la dirección del flujo en el canal, el cual debe ser recto aguas arriba del vertedero en una distancia igual o mayor a diez veces la longitud de la cresta ( $b_c$ ).
- 2. La cresta y los lados del vertedero deben ser rectos y con extremos afilados. La cresta de los vertederos rectangulares y los de tipo Cipoletti debe quedar a nivel entre los puntos extremos.
- 3. El canal aguas arriba debe ser suficientemente amplio para que el aqua se aproxime al vertedero en un curso suave, libre de reflujo y a una velocidad media que no exceda los 0.09 m/s.
- 4. Se deben evitar las restricciones en el canal aguas abajo del vertedero que puedan producir ahogamiento. La cresta debe quedar a una altura mayor que el máximo nivel de agua corriente abajo para que el aire pueda fluir hasta la lámina.

### ANEXO B.4

# CANALETAS DE PROFUNDIDAD CRÍTICA

Estas canaletas se caracterizan por presentar un estrechamiento en la corriente de agua en un canal abierto, lo cual produce una caída en la superficie suficiente para que se dé el fenómeno de flujo crítico sobre la garganta. El estrechamiento o constricción del canal se forma por la contracción de los lados del canal, por la construcción de un pequeño resalto en el fondo o por ambos. Estas canaletas son estructuras en línea; por tanto, su eje central debe coincidir con el eje del canal y no se pueden usar en estructuras de salida, control o regulación de caudal.

El comportamiento hidráulico de una canaleta construida para la medición de agua es esencialmente el mismo que el de un vertedero de cresta larga. En consecuencia, las ecuaciones de carga-caudal para las canaletas de flujo crítico se derivan de la misma forma que para un vertedero de cresta larga (ver Anexo B.2).



Canaleta sin cuello.

Un aspecto importante de las canaletas de profundidad crítica es el alto límite de sumersión o ahogamiento que toleran, comparadas con los vertederos de cresta afilada.

Este límite se define como el punto de ahogamiento causado por el nivel aguas abajo, en el cual, el caudal real se desvía 1% del caudal indicado por la regla de medición. Un alto límite de ahogamiento minimiza la pérdida de carga total en la estructura.

Las canaletas de cuello largo, sin cuello y la tipo Parshall son ejemplos de canaletas de profundidad crítica. Entre estas, la canaleta sin cuello es considerada la más apropiada para los canales abiertos construidos en el área sembrada con caña de azúcar en el valle geográfico del río Cauca, debido a su sencillez geométrica, facilidad en su construcción y a su adaptación en aguas con sedimentos, una situación permanente o transitoria en canales.

#### Canaleta tipo Parshall

Esta canaleta opera bajo el principio de profundidad crítica y está formada por tres secciones principales:

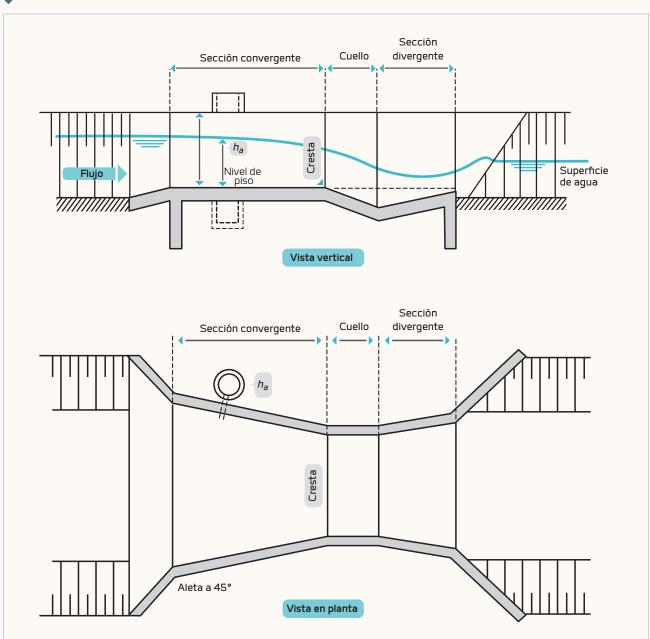
- 1. Convergente o de contracción en su extremo aguas arriba.
- 2. Constreñida o garganta.
- 3. Divergente o de expansión aguas abajo (Figura B.4.1).

En la mayoría de los casos, solo requiere la medida del nivel de aguas arriba de la estructura para determinar el caudal; además, la pérdida de carga que se produce en el canal es muy baja, siendo equivalente a una cuarta parte de la que necesita un vertedero de cresta afilada, lo cual permite su empleo en canales poco profundos de baja pendiente.

Una de las características importantes de la canaleta Parshall es su facultad de soportar un grado de ahogamiento relativamente grande para un rango amplio de caudales de agua. Estas canaletas se construyen en canales principales de riego y requieren paredes convergentes en la parte superior y un piso de aproximación, el cual debe quedar nivelado, tanto longitudinal como transversalmente. El piso de la garganta se inclina hacia abajo y el de la sección divergente hacia arriba.

La relación de carga-caudal en una canaleta Parshall ha sido derivada para unas dimensiones en particular y es válida solo para ellas; por consiguiente, en la construcción, se debe tener especial cuidado de respetar las dimensiones de la canaleta calibrada con el fin de lograr la precisión deseada. Esta es justamente la desventaja de esta canaleta, ya que, en su construcción, las dimensiones, por lo general, sufren un leve cambio y, en consecuencia, su relación de calibración inicial no funciona, lo que obliga a una compleja recalibración que se debe llevar a cabo en laboratorio.

Figura B.4.1 Esquema de la canaleta Parshall para aforo en canales abiertos.



Fuente: Adaptado de Bos (1989).

# **ANEXO B.5**

# CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DEL ORIFICIO SUMERGIDO EN CANALES ABIERTOS

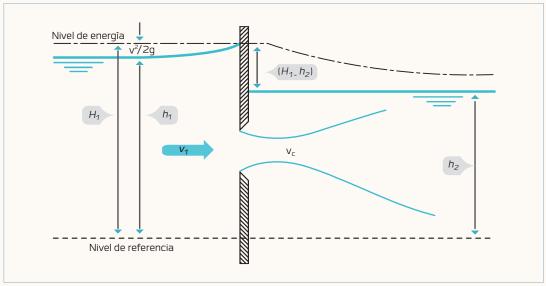
Un orificio sumergido es una abertura de área definida en una compuerta por la que fluye el agua, y su superficie, aguas abajo, se eleva por encima de ella (Figura B.5.1). Los orificios sumergidos pueden ser de dimensiones fijas o construidos de tal forma que su altura sea modificable. Los de dimensiones fijas se denominan orificios sumergidos estándar, y su uso es más frecuente que los orificios de dimensiones variables.

La abertura de un orificio sumergido estándar, por lo general, es rectangular, tiene bordes afilados y su ancho es de dos a seis veces la altura. El orificio debe provocar la contracción completa de la corriente de agua que lo atraviesa, lo cual se logra cuando los lados y la base de la abertura conservan una distancia a los taludes y el fondo del canal mayor que el doble de la dimensión menor del orificio.

Según el Soil Conservation Service (Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos) (1973), el método de aforo con el orificio sumergido se usa en canales con poca pendiente, cuando las condiciones existentes no son adecuadas para el aforo con vertederos de flujo libre. El orificio sumergido presenta las mismas desventajas que los vertederos de cresta afilada con respecto a la acumulación de sedimentos, por lo que la baja exactitud reduce y restringe su uso como estructura de aforo en canales abiertos en el valle geográfico del río Cauca.

En la Figura B.5.2 se observa una estructura típica de orificio sumergido, vista en perspectiva desde aguas arriba. Los materiales de construcción pueden ser concreto, metal o fibra de vidrio. Tanto las paredes como el piso de esta estructura deben estar localizados a una distancia mínima de dos veces la altura del orificio.

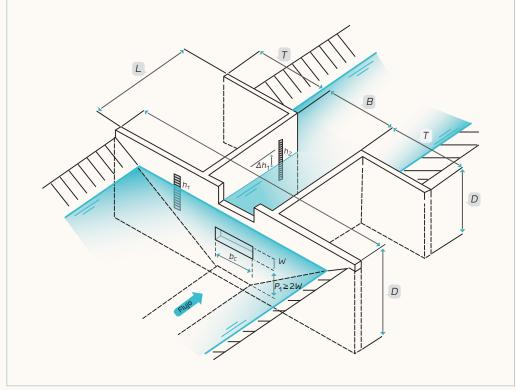
Figura B.5.1 Patrón de flujo a través de un orificio sumergido.



Fuente: Adaptado de Bos (1989).

Figura B.5.2 Estructura de orificio sumergido, vista en perspectiva

desde aguas arriba.



Fuente: Adaptado de U.S. Bureau of Reclamation, citado por Bos (1989).

La parte superior de la compuerta donde se encuentra el orificio debe estar ubicada a un nivel inferior al máximo esperado del agua en el canal, de manera que trabaje como un vertedero de excesos, en caso de que el orificio se obstruya. Las dimensiones que se recomiendan, así como los tamaños para estructuras estándar con orificios sumergidos se incluyen en el Cuadro B.5.1 (Instituto para la Recuperación de Tierras de Estados Unidos, USBR por su sigla en inglés, 1967).

Como la carga hidráulica en el orificio es la diferencia de nivel aguas arriba y aguas abajo  $(h_1 - h_2)$ , la medición se efectúa en estos puntos, utilizando reglas adheridas a las paredes de la estructura. Si no se cuenta con la caja o estructura como la mostrada en la Figura B.5.2, se colocan dos estacas en el canal, con sus extremos superiores en el mismo nivel; una de ellas a 3 m aguas arriba del orificio, y la otra, a 2 m del mismo, corriente abajo. La distancia de los puntos superiores de las estacas a los niveles del agua se mide con una regla. La diferencia en las medidas de estas distancias representa la carga en el orificio. La descarga a través de un orificio sumergido se determina con la fórmula:

$$Q = C_d * C_v * A [2g (h_1 - h_2)]^{1/2}$$

Donde:

- Q: descarga en m<sup>3</sup>/s.
- $\bullet$   $C_d$ : coeficiente de descarga. Para orificios rectangulares de contracción completa:  $C_d = 0.61$ .
- $C_v$ : coeficiente de velocidad. En general, un orificio sumergido debe ser diseñado y conservado de manera que la velocidad de aproximación sea mínima, prácticamente nula. En este caso:  $C_v = 1$ .
- · A: área de la sección del orificio  $(m^2) = w * b_c$  siendo w la altura, y  $b_c$  el ancho del orificio.
- g: aceleración debida a la gravedad  $= 9.81 \text{ m/s}^2.$
- $h_1$   $h_2$ : diferencia de cargas (m) entre los niveles aguas arriba y aguas abajo del orificio.

Cuadro B.5.1 **Dimensiones** sugeridas para orificios sumergidos y estructuras, en metros.

	imensi de orif	000	Altura de estructura	Ancho total del muro que aloja el orificio (E)	Longitud de los muros paralelos al flujo (L)	Distancia entre muros longitudinales (B)	Longitud del muro cabezal aguas abajo (T)
	tura w)	Base b <sub>c</sub>					
0.	.08	0.30	1.20	3.00	0.90	0.75	0.60
0.	.08	0.60	1.20	3.60	0.90	1.05	0.60
0.	.15	0.30	1.50	3.60	1.05	0.75	0.90
0.	.15	0.45	1.50	4.25	1.05	0.90	0.90
0.	.15	0.60	1.50	4.25	1.05	1.05	0.90
0.	.23	0.40	1.80	4.25	1.05	0.90	0.90
0.	.23	0.60	1.80	4.90	1.05	1.05	0.90

Fuente: U.S. Bureau of Reclamation (1967).

# ANEXO B.6

Figura B.6.1 Método de las

coordenadas

del chorro de

agua que sale

del extremo de un tubo en

motobomba.

un pozo o

# MÉTODO DE LAS COORDENADAS PARA EL AFORO EN TUBERÍAS

El método de las coordenadas, o de la trayectoria de Purdue, consiste en medir las coordenadas del chorro de agua que sale del extremo de un tubo de descarga de un pozo o motobomba (Figura B.6.1).

Este método se basa en el principio del proyectil, asumiendo que el componente de velocidad horizontal del flujo es constante y que la única fuerza que actúa sobre el chorro es la gravedad. En el tiempo (t), una partícula de la parte superior del chorro se desplazará a una distancia horizontal (X) desde la salida del tubo, siendo igual a:

$$X = V_0 * t$$

X D Y

Donde  $v_o$  es la velocidad en el punto en el que X = 0, y t es el tiempo en el cual la partícula cae una distancia vertical (Y en metros), siendo igual a:

$$Y = \left(\frac{1}{2}\right) * g * t^2$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

Despejando t en cada ecuación, igualando las ecuaciones resultantes y despejando  $v_o$  se tiene:

$$V_O = \frac{X}{\left(\frac{2Y}{g}\right)^{1/2}}$$

Multiplicando cada término por el área interior del tubo  $\pi D^2/4$  y por un coeficiente de descarga  $C_d$  se obtiene el caudal Q:

$$Q = C_d * \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) * \left(\frac{gX^2}{2Y}\right)^{1/2}$$

Los límites de aplicación del método de las coordenadas que permiten una medición razonablemente precisa de la descarga de una tubería horizontal, son los siguientes:

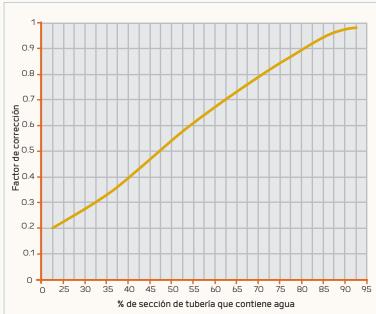
- 1. El tubo debe tener bordes o pestañas lisas y un diámetro constante, al menos, en una longitud de 6D desde la salida.
- 2. El tubo debe estar recto y completamente horizontales, por lo menos, hasta una distancia de 6D desde la salida.
- 3. El chorro de agua debe tener descarga libre.

El método de las coordenadas se emplea solo cuando no se dispone de otros medios más precisos de medición y donde sea permisible un error de 10% o mas. Para medir el flujo en tubos de descarga horizontal, estas coordenadas se miden desde la parte superior de la salida del tubo hasta un punto situado en la parte superior del chorro. Estas distancias horizontales y verticales se denominan coordenadas X y Y, respectivamente. Las ecuaciones para calcular el caudal en el sistema métrico son las siguientes:

$$Q = A * v$$

$$A = \pi * \frac{D^2}{4}$$

Figura B.6.2 Valores del factor de corrección de acuerdo con el valor del porcentaje de la sección de tubería que contiene agua.



Fuente: Adaptado de Soil Conservation Society (1973).

#### Donde:

- *Q*: caudal (m<sup>3</sup>/s).
- A: área de la sección de salida de la tubería  $(m^2).$
- π: 3.1416
- D: diámetro de la tubería (m).
- v: velocidad (m/s).

$$V = \frac{X}{\left(\frac{2Y}{g}\right)^{1/2}}$$

#### Donde:

- X: componente horizontal (m) de la trayectoria del chorro.
- Y: componente vertical (m) de la trayectoria del chorro.
- g: aceleración gravitacional (9.81 m/s²).

En tuberías parcialmente llenas, es necesario hacer un ajuste por medio del factor de corrección (F), que se obtiene al medir la distancia vertical entre la superficie del agua y la pared superior de la tubería (h) en el punto de salida, lo que permite calcular el porcentaje de la sección de la tubería que contiene agua (*P*):

$$P = \left(1 - \frac{h}{D}\right) * 100$$

#### Donde:

- P: porcentaje de la tubería con agua (%).
- h: distancia entre la superficie del agua y la pared superior de la tubería (m).
- D: diámetro de la tubería (m).

Con el valor de P en la Figura B.6.2 se obtiene F. El cálculo de caudal se determina de la siguiente forma:

$$Q = A * v * F$$



# **REFERENCIAS**BIBLIOGRÁFICAS

- Alarcón Muriel, S.L. y J.R. Cruz Valderrama. 2012. **Precipitación efectiva en el cultivo de la caña para programar los riegos mediante el balance hídrico.** Vol. 1, pp. 557-567. En: VIII Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Latinoamérica y el Caribe y IX Congreso de la Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar (Tecnicaña). Memorias. Septiembre 12-14. Cali, Colombia.
- Allen, R.G.; Pereira, L.S; Raes, D. y M. Smith. 2006. **Evapotranspiración** del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje No. 56. Roma: FAO. 299 pp.
- Allen, R.G.; Wright J.L.; Pruitt, W.O; Pereira, L.S. y M.E. Jensen. 2007. **Design and operation of farm irrigation systems.** Cap.8. En: Water requeriment. 2ª ed. *Amer. Soc. Agric. Biol. Eng.* 863 pp. Disponible en: <a href="http://elibrary.asabe.org/azdez.asp?JID=7&AID=23691&CID=dos2007&T=1>">http://elibrary.asabe.org/azdez.asp?JID=7&AID=23691&CID=dos2007&T=1>">http://elibrary.asabe.org/azdez.asp?JID=7&AID=23691&CID=dos2007&T=1>">http://elibrary.asabe.org/azdez.asp?JID=7&AID=23691&CID=dos2007&T=1>">http://elibrary.asabe.org/azdez.asp?JID=7&AID=23691&CID=dos2007&T=1>">http://elibrary.asabe.org/azdez.asp?JID=7&AID=23691&CID=dos2007&T=1>">http://elibrary.asabe.org/azdez.asp?JID=7&AID=23691&CID=dos2007&T=1>">http://elibrary.asabe.org/azdez.asp?JID=7&AID=23691&CID=dos2007&T=1>">http://elibrary.asabe.org/azdez.asp?JID=7&AID=23691&CID=dos2007&T=1>">http://elibrary.asabe.org/azdez.asp?JID=7&AID=23691&CID=dos2007&T=1>">http://elibrary.asabe.org/azdez.asp?JID=7&AID=23691&CID=dos2007&T=1>">http://elibrary.asabe.org/azdez.asp?JID=7&AID=23691&CID=dos2007&T=1>">http://elibrary.asabe.org/azdez.asp?JID=7&AID=23691&CID=dos2007&T=1>">http://elibrary.asabe.org/azdez.asp?JID=7&AID=23691&CID=dos2007&T=1>">http://elibrary.asabe.org/azdez.asp?JID=7&AID=23691&CID=dos2007&T=1>">http://elibrary.asabe.org/azdez.asp?JID=7&AID=23691&CID=1</a>
- Benítez Cano, E. 1994. **Evaluación hidráulica y económica de politubulares con orificios para riego por surcos en caña de azúcar.** Tesis. Ingeniero Agrícola. Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Cali, Colombia. 178 pp.
- Bos, M.G. 1989. **Discharge measurement structures.** 3ª ed. Publication 20. International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI). 401 pp.
- Campos Rivera, A. y D.M. Cruz Bermúdez. 2010. **Riego con caudales reducidos: una opción para el piedemonte.** Tercer informe técnico presentado al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). Cenicaña. 22 pp.
- Campos Rivera, A.; Cruz Bermúdez, D.M. y G. Meléndez. 2015. Fertirriego por goteo con tres dosis de nitrógeno para el cultivo de caña de azúcar en un suelo fragmental. En: X Congreso Tecnicaña 2015. Memorias. Tomo 1: Campo (en imprenta).

- Carbonell González, J.A.; Quintero Durán, R.; Torres Aguas, J.S.; Osorio Murillo, C.A.; Isaacs Echeverri, C.H. y J.I. Victoria Kafure. 2011. Zonificación agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el valle del río Cauca (cuarta aproximación). Principios metodológicos y aplicaciones. Cali, Colombia. 119 pp. (Serie Técnica N.º 38).
- Cenicaña (Centro de Investigaciones de la Caña de Colombia). 1981, octubre. Informe de Labores 1980. Cali, Colombia. pp. 29-34.
- Cenicaña (Centro de Investigaciones de la Caña de Colombia). 1984. Informe anual 1983. Cali, Colombia. 88 pp.
- . 1992. **Informe anual 1991.** Cali, Colombia. 64 pp.
- \_. 1993. **Informe anual 1992.** Cali, Colombia. 65 pp.
- Cruz Valderrama, J.R.; Besosa, R. y J. Gómez. 1997. Gestión de calidad del riego en caña de azúcar. Vol. 1, pp. 217-228. En: VI Congreso Colombiano de la Asociación de Técnicos de la Caña de Azúcar (Tecnicaña). Memorias. Septiembre 24-26. Cali, Colombia.
- Cruz Valderrama, J.R. y C.A. Moreno Gil. 2000. Respuesta de la producción de caña al agua. 10 pp. En: V Congreso Colombiano de la Asociación de Técnicos de la Caña de Azúcar (Tecnicaña). Memorias. Octubre 4-6. Cali, Colombia.
- \_; Álvarez, L.; Prada, M. y L. Sluga. 2003a. El riego por pulsos: un paso más hacia la reducción de los costos de riego en caña de azúcar. Vol. 1, pp. 134-142. En: VI Congreso Colombiano de la Asociación de Técnicos de la Caña de Azúcar (Tecnicaña). Memorias. Septiembre 24-26. Cali, Colombia.
- ; Posada Contreras, C.; Lemos, R.D. y A. Valdés. 2003b. Comparación entre politubulares y tuberías de PVC con compuertas para riego por surcos. Vol. 1, pp. 122-133. En: VI Congreso Colombiano de la Asociación de Técnicos de la Caña de Azúcar (Tecnicaña). Memorias. Septiembre 24-26. Cali, Colombia.
- .; Fernández, L.; Arias, R. y A. Roldán. 2006. Reducción de los costos de riego por surco mediante el control de tiempo de avance y caudal por surco. pp. 29-41. En: VII Congreso de la Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar (Tecnicaña). Memorias. Septiembre 6-8. Cali, Colombia.
- ; Torres Aguas, J.S.; Besosa, R.; Gómez, J. y J Pantoja. 2009a. Función de K para mejorar la precisión en la programación de los riegos. pp. 289-297. En: VII Congreso de la Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar (Tecnicaña). Memorias. Septiembre 16-18. Cali, Colombia.
- \_; Torres Aguas, J.S.; Besosa, R. y R. Rojas. 2009b. Función de respuesta de la caña al agua. pp. 256-263. En: VIII Congreso Colombiano de la Asociación de Técnicos de la Caña de Azúcar (Tecnicaña). Cali. Memorias. Septiembre 16-18. Cali, Colombia.
- . 2003. Diseño de los campos para la cosecha de caña en verde. Vol. 1. VI Congreso Colombiano de la Asociación de Técnicos de la Caña de Azúcar (Tecnicaña). Septiembre 24-26. Memorias. Cali, Colombia.
- . 2012. Ferti-riego por goteo. Informe interno. Programa de Agronomía. Cenicaña. Cali, Colombia.

- \_\_\_\_\_\_\_. 2012. **Función de respuesta de la producción de caña al agua.** pp. 545-556. En: VIII Congreso de la Asociación Azucareros de Latinoamérica y el Caribe y IX Congreso de la Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar (Tecnicaña). Memorias. Septiembre 12-14. Cali, Colombia.
- . 2014. **Control Administrativo del Riego (CAR). Guía metodológica.** Cenicaña. Cali, Colombia. 80 pp. (Materiales para la transferencia de tecnología en la agroindustria de la caña de azúcar. Sistema de producción agrícola).
- CVC (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca). 2006. **Acuerdo 035 de 2006.** 2 pp.
- Doorenbos J., Kassam A.H. 1986. **Yield response to water.** FAO Irrigation and Drainage Paper 33. FAO, Roma. 194 pp.
- Doorenbos, J.; W.O. Pruitt. 1992. **Guidelines for predicting crop water requirements.** FAO Irrigation and Drainage Paper 24. FAO, Roma.
- González, A. 1980. **Suelos agrícolas. Notas de laboratorio.** (Manuscrito). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Palmira. pp. 18-75.
- Grillo, M. 1975. **Laboratorio de riegos y drenajes. (Manuscrito).** Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Palmira. 55 pp.
- Haise, H.R.; Donnan, W.W.; Phelan, J.T.; Lawhon, L.F.; Shockley, D.G. 1956. The use of cylinder infiltrometers to determine the intake characteristics of irrigated soils. Publ. ARS 41-7, Agricultural Research Service and Soil Conservation Service, USDA, Washington, D. C.
- Ideam (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 1999. **Mediciones hidrométricas.** Subdirección de Hidrología. Colombia.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2006. Estudio detallado de suelos y capacidad de uso de las tierras sembradas con caña de azúcar localizadas en el valle geográfico del río Cauca. Informe general. IGAC-Cenicaña: Cali, Colombia. 37 pp.
- Kraatz, D.B.; Mahajan, I.K. 1982. **Small hydraulic structures**. Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO Irrigation and drainage. Paper 26/2. Roma.
- Koorevaar, P.; Menelik, G. y C. Dirksen. 1983. **Elements of soil physics. Developments in soil science 13.** Department of Soil Science and Plant Nutrition. Agricultural University of Wageningen, Holanda. 228 pp.
- Links Ingeniería. 2014. **Sistemas de medición con registro continuo.** Presentación realizada en el curso de medición de agua. Convenio Sena Asocaña. Cenicaña. Cali, Colombia.
- Rebolledo, J.P. 1997, septiembre 24-26. **Evaluación operativa del riego con politubulares.** Vol. 1, pp. 229-242. En: IV Congreso de la Sociedad Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar. Memorias. Cali, Colombia.
- Roscher, K. 1985. **Surface irrigation lecture notes.** Agricultural University, Wageningen, Holanda.

- Smith R.E. y Warrick A.W. 2007. Soil water relationships. Chap. 6. Design and operation of farm irrigation systems. American Society of Agricultural and Biological Engineers, Michigan. pp. 120-159.
- Soil Conservation Service. US Department of Agriculture. 1973. National Engineering Handbook, Section 15: Irrigation, chapter 9, Measurement of Irrigation Water. 70 pp.
- Solomon, K.H.; El-Gindy, A.M.; Ibatullin, S.R. 2007. Planning and system selection. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) Publication. Design and operation of farm irrigation systems 3: pp. 57-75.
- Tafur, H. 1984. **Guía metodológica para la determinación de algunos parámetros** en riegos y drenajes. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Palmira, Colombia. pp. 9-30.
- Torres Aguas, J.S. y J.R. Cruz Valderrama. 1993. El aforador RBC. Cenicaña. Cali, Colombia. 4 pp. (Serie Divulgativa N.º 04).
- \_; Villegas Trujillo, F. y J.R. Cruz Valderrama. 1995. Alternate-furrow irrigation of sugarcane. pp. 168-174. En: XXII Congress of International Society of Sugar Cane Technologists (ISSCT). Cartagena, Colombia.
- . 1997. Riego por surco alterno en caña de azúcar. Vol. 1, pp. 191-199. En: IV Congreso de la Sociedad Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar (Tecnicaña). Septiembre 24-26. Memorias. Cali, Colombia.
- ; Cruz Valderrama, J.R., Villegas Trujillo, F. 2004. Avances técnicos para la programación y manejo del riego en caña de azúcar. 2ª ed. Cenicaña. 66 pp. (Serie Técnica N.º 33).
- \_; Cruz Valderrama, J.R.; Gómez A.; Londoño, J.; Campos, A y J. Caicedo. 2009. Afinamiento y validación de los grupos de humedad usados en la zonificación agroecológica. En: X Congreso Colombiano de la Asociación de Técnicos de la Caña de Azúcar (Tecnicaña). Memorias. Cali, Colombia. 12 pp.
- Trueba, S. 1976. **Hidráulica**. Continental. México. 454 pp.
- U.S. Bureau of Reclamation. 1967. Water measurement manual. 2ª ed. U.S. Gov. Printing office. Washington. 326 pp.
- Wahl, T.L.; Clemmens, A.J.; Bos, M.G. y J.A. Replogue. 2014. The WinFlume Home Page. Reclamation, Managing Water in the West. U.S. Department of the Interior. Bureau of Reclamation. Disponible en: http://www.usbr.gov/tsc/ hydlab/winflume/
- Walker, W. y G. Skogerboe. 1985. The theory and practice of surface irrigation. Utah State University.
- Yang, S.J. y J.S. Torres Aguas. 1984. Estudio preliminar sobre los requerimientos de agua y riego de la caña de azúcar en el Valle del Cauca. pp. 323-335. En: I Congreso de la Sociedad Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar (Tecnicaña). Memorias. Cali, Colombia.

# LISTADO DE **CUADROS**

1.1	Relación entre la textura del suelo, el agua disponible para las plantas y la frecuencia de riego
1.2	Valores de <i>THS</i> y <i>CHg</i> en un suelo de la consociación Manuelita
2.1	Precipitación media mensual multianual a partir de la Red Meteorológica Automatizada
2.2	Precipitación anual en orden descendente y frecuencia relativa para calcular el factor con el cual se determina la precipitación mensual con una frecuencia de 75%
2.3	Promedio de precipitación mensual y precipitación con probabilidad de 75%
2.4	Precipitación con frecuencia de 75% y precipitación efectiva mensual con una probabilidad de 75%
2.5	Precipitación efectiva y evaporación media mensual multianual calculada a partir del dato medido en el tanque clase A
2.6	Evapotranspiración mensual de la caña de azúcar y requerimiento de riego neto
2.7	Aplicación de la función de respuesta a la aplicación de agua encontrada en la zona agroecológica 11H0, suelo Manuelita, variedad CC 85-92, soca
3.1	Precipitación mensual multianual, zona centro del valle geográfico del río Cauca
3.2	Precipitación anual en orden descendente y frecuencia relativa calculada para la zona centro del valle del río Cauca
3.3	Precipitación mensual con probabilidad de ocurrencia de 75%
3.4	Precipitación efectiva mensual con una probabilidad de ocurrencia de 75%
3.5	Precipitación efectiva y evaporación media mensual multianual calculada a partir del dato medido en el tanque clase A
3.6.	Evapotranspiración mensual del cultivo de la caña de azúcar ( $ET = E * 0.7$ ) y requerimiento de riego neto ( $RRn = ET - Pe$ )
4.1	Secciones típicas de canales y alturas de cresta sugeridas para el aforador RBC, en campos cultivados con caña de azúcar en el valle geográfico del río Cauca, Colombia
4.2	Tabla de calibración del aforador RBC para secciones típicas de canales en campos cultivados con caña de azúcar en el valle geográfico del río Cauca, Colombia
4.3	Ayuda para la interpretación de los resultados del programa de calibración del aforador RBC
5.1	Valores medios para la lámina de riego neta ( $L_m$ ) en riego por surcos
5.2	Caudal por surco (l/s) en cultivo de caña de azúcar, en función de la pendiente en la dirección del surco y de la textura del suelo

5.3	Valores de pendiente y longitud de surco para diseño de riego por surcos en caña de azúcar, según la familia de infiltración de agua en el suelo	120
5.4	Listado de chequeo para evaluación preliminar de riego por surcos	122
5.5	Valores de referencia y estrategias de mejoramiento para los indicadores de calidad en la gestión del riego por surcos en caña de azúcar	123
5.6	Valores de referencia de los indicadores obtenidos en la evaluación preliminar de riego por aspersión con cañones	137
5.7	Formato para evaluar el estado de equipos de riego por aspersión con cañones	138
5.8	Formato para medir los parámetros de campo del control administrativo del riego por aspersión con cañones.	140
5.9	Valores de referencia de los indicadores obtenidos en el control administrativo de riego por aspersión con cañones	143
A.1.	1 Resultados obtenidos en una prueba de infiltración con cilindros infiltrómetros	155
A.1.	Valores de tiempo acumulado y lámina infiltrada acumulada     para determinar la ecuación de infiltración acumulada	156
A.1.	Datos obtenidos en una prueba de infiltración con anillos en un suelo franco arcilloso	157
A.1.	4 Resultado de una prueba de infiltración en surcos utilizando el método de caudal de entrada y salida	160
A.3.	Lámina de agua rápidamente aprovechable ( <i>LARA</i> ) estimada     para 179 suelos representativos del valle geográfico del río Cauca	161
B.1.	Tabla para calibración de canaleta sin cuello bajo condición de flujo libre	163
В.3.	Requisitos de un vertedero de cresta afilada rectangular y de contracción completa	169
В.З.	2 Caudal por metro de ancho de cresta (m³/s por metro) en un vertedero Cipoletti, en función de la carga hidráulica $h_1$ (m)	. 170
B.5.		
B.5.	1 Dimensiones sugeridas para orificios sumergidos y estructuras	178

### LISTADO DE **EJEMPLOS**

Cálculo del potencial total de agua en un suelo no saturado	23
Cálculo del potencial total de agua en un suelo saturado	24
Cómo obtener la curva de retención de agua del suelo	25
Cálculo del agua aprovechable en el suelo	28
Cálculo de la LARA	30
Cálculo de la LARA en un suelo con alto contenido de piedra	31
Cálculo del requerimiento de riego operativo	49
Cálculo del requerimiento de riego a largo plazo	51
Caudal disponible en una unidad productiva	65
Área regada por día	66
Cómo estimar el caudal real de una fuente	67
• Cálculo del caudal equivalente suministrado por un cauce superficial más un embalse	68
Caudal equivalente en un embalse de regulación en la época lluviosa	70
Caudal equivalente en un pozo profundo más reservorio	72
• Cálculo de la precipitación efectiva en la zona centro del valle geográfico del río Cauca	74
Determinar el requerimiento de riego en la fuente de agua	76
Cálculo de balance hidrológico	80
Cálculo del caudal en una canaleta sin cuello	99
• Cálculo de la carga hidráulica en la entrada $(h_a)$ y la salida $(h_b)$ de una canaleta sin cuello	101
Diseño de una canaleta sin cuello	102
Determinar el caudal de una tubería con orificio de salida	108
Diseño de riego por surcos	119
Cálculo de área regada por turno	136
Cálculo del volumen de agua suministrado	137
Control administrativo de riego por aspersión con cañones y tubería portátil	141
Control administrativo de riego por aspersión con moto-cañón	143
Medición de la infiltración con cilindros infiltrómetros	155
Medición de la infiltración con cilindros infiltrómetros en un suelo representativo de nuestra región	157
Cálculo de infiltración utilizando el método de caudal de entrada y salida en surco	160

# LISTADO DE **FIGURAS**

1.1	Tipos de estructuras frecuentes en suelos minerales				
1.2	Zonas de humedad en el perfil del suelo después de un tiempo de iniciado un riego o una lluvia fuerte				
1.3	Velocidad de infiltración en función del tiempo de aplicación de agua en el suelo	. 20			
1.4	Infiltración acumulada en función del tiempo de aplicación de agua	. 20			
1.5	Poros que se forman entre las partículas de suelo				
1.6	Cálculo del <i>Pg</i> en el suelo en el punto A, respecto al nivel de referencia <i>NR1</i>	. 22			
1.7	Pp en un suelo saturado y datos para el cálculo del Pt respecto al nivel de referencia (NR)	. 22			
1.8	Concepto de presión osmótica de agua en el suelo	. 23			
1.9	Cálculo del potencial total de agua (Pt) en un suelo no saturado	. 23			
1.10	Curvas típicas de retención de humedad para suelos arcillosos y arenosos	. 24			
1.11	A. Tensiómetro utilizado en campo. B. Olla y plato de presión para determinar la curva de retención de agua del suelo	. 25			
1.12	Curva de retención de agua en un suelo Manuelita	. 26			
1.13	Constantes de humedad del suelo que definen el agua aprovechable y el agua rápidamente aprovechable.	. 27			
2.1	Estructura típica de la raíz para explicar la absorción de agua y nutrientes	. 36			
2.2	Línea de mejor ajuste con los valores de presentación anual (eje $Y$ ) $vs.$ frecuencia (eje $X$ )	. 47			
2.3	Grupos de humedad identificados en el valle geográfico del río Cauca	. 53			
2.4	Grandes zonas de precipitación identificadas por Cenicaña	. 54			
3.1	Línea de mejor ajuste con los valores de frecuencia en el eje $X$ y precipitación anual en el eje $Y$	. 75			
4.1	Excavación e instalación de recipiente graduado para medición volumétrica de caudal de agua en surcos que captan agua por aberturas en el canal regador	. 87			
4.2	Esquemas y fórmulas para calcular las áreas de sección transversal de diferentes tipos de canales abiertos	. 88			
4.3	A. Detalle de molinete. B. Micromolinete de hélices para medir la velocidad del agua en canales abiertos	. 89			
4.4	Sección transversal de aforador RBC	. 90			
4.5	Mediciones en la sección transversal de un canal necesarias para diseñar y calibrar el aforador RBC	. 93			
4.6	Aforador RBC permanente construido en concreto en un canal de riego primario	. 96			
4.7	Dibujo en perspectiva del vertedero de cresta afilada de sección transversal rectangular	. 97			

4.8	Detalle de las proporciones de las medidas de la canaleta sin cuello			
4.9	Valores de $K$ , $n$ y $S_{\rm t}$ en función de $L$ (longitud) para determinar el caudal medido en una canaleta sin cuello	. 99		
4.10	Cálculo de la carga hidráulica en la entrada ( $h_a$ ) y la salida ( $h_b$ ) para la instalación de canaleta sin cuello	101		
4.11	Dimensiones finales de la canaleta sin cuello, con base en el ejemplo de diseño propuesto	102		
4.12	Patrón de flujo a través de un orificio sumergido	103		
4.13	Sistema de registro de caudal continuo para canales abiertos desarrollado por Cenicaña e ingenieros de la Universidad del Valle	104		
4.14	Medidor con sensor de efecto Doppler ultrasónico para canales abiertos	105		
4.15	Medidor de turbina para flujo en tuberías o pozos profundos	106		
4.16	Medidor de hélice para flujo en tuberías o pozos profundos.  A. Estructura externa. B. Componentes internos	106		
4.17	Piezómetro instalado aguas arriba del orificio de salida del tubo horizontal de descarga de un pozo o motobomba	107		
4.18	Valores del coeficiente $C$ de la ecuación de caudal de un orificio, en función de la relación diámetro del orificio/diámetro del tubo	108		
4.19	Método de las coordenadas X y Y del chorro de agua de un tubo de salida en un pozo o motobomba	109		
4.20	Medidor de tipo electromagnético para caudal con registro continuo en tuberías	109		
4.21	Medidor de efecto Doppler ultrasónico para determinar la velocidad de flujo por medio de la diferencia entre la frecuencia de las ondas sónicas enviada y recibida	110		
5.1	Riego por surcos en el encalle al 4 x 1 de caña de azúcar	125		
5.2	Opción económica de riego por surcos en el encalle 4 x 1 de caña de azúcar	125		
5.3	Riego por surcos en el encalle 2 x 1 de caña de azúcar	126		
5.4	Opción económica de riego por surcos en el encalle 2 x 1 de caña de azúcar	126		
5.5	Conformación del entresurco con dos surcos pequeños en forma de V, en ambos lados de la calle, para facilitar el flujo del agua cercano a las hileras de plantas	127		
5.6	Utilización de politubular con compuertas en reemplazo de las acequias de riego, para riego por surcos	127		
5.7	Tubería portátil de PVC con compuertas para riego por surcos.	128		
5.8	Disminución del caudal debido a la ampliación de la longitud de la tubería de PVC con compuertas	130		
5.9	Válvula T de mariposa para riego por pulsos	132		
5.10	Riego por pulsos o aplicación intermitente de agua a los surcos	133		
5.11	Riego con caudal reducido (0.1 l/s – 0.3 l/s) en suelos de piedemonte	134		
5.12	Riego por aspersión con dos cañones y presión de 6 kg/cm² (85 psi), instalados en tubería portátil	135		

5.13	Riego por aspersión con un cañón de 9 kg/cm² (125 psi) de presión, incorporado a una motobomba (moto-cañón)	135
5.14	Riego por pivote central	146
5.15	Riego por goteo de bajo costo instalado en franjas pedregosas	147
A.1.1	Triángulo utilizado para identificar la textura del suelo directamente en campo	152
A.1.2	Anillos infiltrómetros para determinar la velocidad de infiltración con fines de diseño de sistemas de riego por aspersión, goteo y melgas	153
A.1.3	Esquema de instalación de los cilindros infiltrómetros fijados en el suelo con el detalle de la regla y el gancho para medir el nivel del agua en el cilindro interior	154
A.1.4	Infiltración acumulada vs. tiempo acumulado	154
A.1.5	Infiltración acumulada determinada mediante regresión potencial vs. tiempo acumulado	157
A.1.6	Función de la velocidad de infiltración, determinada a partir de una prueba de campo con anillos infiltrómetros en un suelo franco arcilloso del valle geográfico del río Cauca	158
A.1.7	Velocidad de infiltración en función del tiempo acumulado. Valores ajustados mediante regresión de potencia.	160
B.2.1	Patrón de flujo de agua sobre un vertedero de cresta larga	166
B.2.2	Sección de control rectangular de un vertedero de cresta larga	168
B.2.3	Valores del coeficiente de descarga $C_d$ en función de la relación entre la carga total de energía medida por encima de la cresta y la longitud del cuello	168
B.2.4	Valores de $C_{\nu}$ en función de la tasa de área para una sección de control rectangular	168
B.3.1	Perfil y parámetros hidráulicos de un vertedero de cresta afilada	169
B.3.2	Vertedero de cresta afilada y sección rectangular	170
B.3.3	Valores de $K_b$ en función de $b_c/B_1$ para determinar el caudal en un vertedero rectangular de cresta afilada	170
B.3.4	Valores del coeficiente de descarga efectivo $C_{\rm e'}$ en función de la relación $b_{\rm c}/B_{\rm 1}$ , y el valor de $h_{\rm 1}/p_{\rm 1}$ para la evaluación del caudal en un vertedero de cresta afilada rectangular	171
B.3.5	Esquema de un vertedero Cipoletti (cresta afilada trapezoidal)	171
B.4.1	Esquema de la canaleta Parshall para aforo en canales abiertos	175
B.5.1	Patrón de flujo a través de un orificio sumergido	176
B.5.2	Estructura de orificio sumergido, vista en perspectiva desde aguas arriba	177
B.6.1	Método de las coordenadas del chorro de agua que sale del extremo de un tubo en un pozo o motobomba	178
B.6.2	Valores del factor de corrección de acuerdo con el valor	170

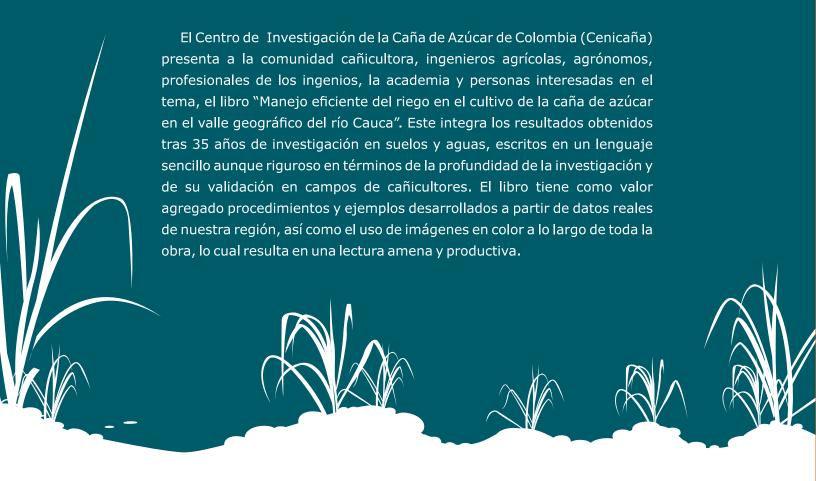
### LISTADO DE **PROCEDIMIENTOS**

Calcular la precipitación efectiva	45
Calcular el requerimiento de riego operativo	48
Calcular el requerimiento de riego a largo plazo	51
Calcular el caudal de un embalse de regulación semanal	68
Calcular el caudal de un embalse de regulación en época lluviosa	69
Calcular el caudal de un pozo profundo más reservorio	71
Medición con flotador	88
Diseño y calibración del aforador RBC	95
Diseño en campos establecidos	117
Diseño en predios nuevos	120
Evaluación de riego por surcos	121
Determinar la infiltración utilizando los anillos infiltrómetros	154
Uso de la velocidad de infiltración en el diseño de riego por aspersión	158
Determinar la infiltración usando el método del caudal de entrada y salida en un surco	159



Cenicaña es una corporación privada, sin ánimo de lucro, fundada en 1977 por iniciativa de la Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia (Asocaña) y financiada con donaciones directas de los ingenios azucareros y los proveedores de caña localizados en el valle geográfico del río Cauca. Su misión es contribuir al desarrollo, la competitividad y la sostenibilidad del sector agroindustrial de la caña de azúcar de Colombia, mediante la generación de conocimiento y la innovación tecnológica, a través de la investigación, la transferencia de tecnología y la prestación de servicios especializados, con base en un sistema integrado de gestión, para que el sector sea reconocido por sus aportes socioeconómicos y la conservación ambiental de las zonas productoras de caña de azúcar. Así, Cenicaña favorece la innovación en la agroindustria gestionando proyectos de investigación y desarrollo, acordes con la planeación estratégica del sector productivo. Dirige programas de investigación en variedades, agronomía y procesos de fábrica, y servicios especializados en información y documentación, tecnología informática, análisis económico y estadístico, y cooperación técnica y transferencia de tecnología.

En sus funciones de apoyo sectorial, Cenicaña administra la Red Meteorológica Automatizada y la Red PM-10 de la agroindustria azucarera en el valle del río Cauca. Atiende solicitudes de importación de variedades en Colombia y presta servicios de propagación y multiplicación de variedades, análisis de suelo y tejido foliar, inspección fitopatológica en campo y laboratorio, diagnóstico de enfermedades de la caña de azúcar, e información y documentación.



Tarifa postal reducida. Servicios Postales Nacionales S.A. N.º 2015 – 671 4-72, vence 31 de diciembre. 2015.

# www.cenicana.org





Remite / Cenicaña. Calle 58N 3BN-110 Cali, Colombia

Línea de atención al cliente:

(57 - 1) 472 2000 en Bogotá 01 8000 111 210 a nivel Nacional

www.4-72.com.co

El servicio de **envíos** de Colombia

