



Serie Técnica
No. 33

CENTRO DE INVESTIGACIÓN
DE LA CAÑA DE AZÚCAR DE COLOMBIA

Avances técnicos para la programación y el manejo del riego en caña de azúcar

Segunda edición

Jorge S. Torres Aguas ¹
Ricardo Cruz Valderrama ²
Fernando Villegas Trujillo ³

Cali, Colombia
Febrero de 2004

1. Director del Programa de Agronomía, Ingeniero Agrónomo, Ph.D., CENICAÑA.

2. Ingeniero de Suelos y Aguas, Ingeniero Agrícola, M.Sc., CENICAÑA.

3. Ingeniero de Mecanización Agrícola, Ingeniero Agrícola, M.Sc., CENICAÑA.

Publicación CENICAÑA
ISSN 0120-5846

CITA BIBLIOGRÁFICA

Torres A., J.S.; Cruz V., R.; Villegas T., F. 2004. Avances técnicos para la programación y el manejo del riego en caña de azúcar. Segunda edición. Cali, Cenicaña. 66p. (Serie Técnica no.33)

COMITÉ EDITORIAL

Álvaro Amaya Estévez
Carlos O. Briceño Beltrán
Camilo H. Isaacs Echeverry
Guadalupe Bustamante Álvarez
Nohra Pérez Castillo
Victoria Carrillo Camacho

PRODUCCIÓN EDITORIAL

SERVICIO DE COOPERACIÓN TÉCNICA Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA
Coordinación editorial y edición de textos: Victoria Carrillo Camacho
Diagramación: Alcira Arias Villegas
Fotografía de carátula: Camilo H. Isaacs Echeverry
Preprensa e impresión: Feriva S.A.
Tiraje: 1900 ejemplares
Febrero de 2004

DIRECCIÓN POSTAL

Calle 58 norte No. 3BN-110
Cali, Valle del Cauca, Colombia

ESTACIÓN EXPERIMENTAL

San Antonio de los Caballeros
Vía Cali-Florida, km 26
Tel: (57-2) 260 66 11
Fax: (57-2) 260 78 53
www.cenicana.org
buzon@cenicana.org

Contenido

	Página
Sistema suelo-agua	1
El agua en el suelo.....	2
Mecanismos de retención de humedad	3
Agua aprovechable (AA)	4
Lámina de agua rápidamente aprovechable (LARA)	6
Sistema planta-agua	9
Absorción de agua	9
Transpiración.....	9
Evapotranspiración (Et).....	10
Requerimientos de riego	12
Fuentes, manejo y medición del agua	14
Fuentes de agua	14
Manejo del agua.....	15
Medición del agua	19
Programación de riegos	21
Balance hídrico	23
Balance hídrico diario	26
Balance hídrico semanal.....	26
Programación con pozos de observación	26
Programación con el tanque Cenirrómetro	29
Ejemplo de cálculo del balance hídrico.....	33
Balance diario	33
Balance semanal	35
Requerimientos de riego de acuerdo con la época de siembra o cosecha	37
Zonificación climática por balance hídrico	39

	Página
Apéndice	45
Propiedades físicas del suelo	45
Separados del suelo	45
Textura	45
Textura al tacto	45
Textura por análisis mecánico	46
Estructura.....	47
Densidad aparente (Da).....	48
Humedad gravimétrica	48
Humedad volumétrica (θ)	48
Capacidad de campo (CC)	49
Punto de marchitamiento permanente (PMP).....	50
Lámina de agua	50
Lámina de agua aprovechable (LAA)	51
Lámina de agua rápidamente aprovechable (LARA).....	51
Ejemplo de cálculo.....	51
Pozos de observación.....	52
Uso de politubulares en reemplazo de las acequias de riego.....	53
Politubular a nivel.....	54
Politubular en pendiente	55
Instalación	56
Manejo y almacenamiento	57
Uso de tubería rígida con compuertas para riego por surcos	57
Tubería de PVC a nivel.....	58
Tubería de PVC en pendiente.....	59
Tubería de PVC en contrapendiente.....	59
Instalación	59
Sifones para riego por surcos	60
Aforador de orificio para tuberías y pozos.....	61
Tabla de calibración para aforadores RBC	62
Lista de abreviaturas y siglas	64
Referencias bibliográficas	66

Introducción

El valle del río Cauca es una región que puede ser considerada semihúmeda, con suelos de textura fina, donde se siembra y cosecha caña de azúcar durante todo el año. El riego se ha tomado como una práctica habitual y en el 95% del área cultivada se aplican riegos suplementarios. En años normales la precipitación oscila entre 800 y 2600 mm con dos períodos lluviosos que abarcan los meses de marzo a mayo y septiembre a noviembre.

La disponibilidad de agua para riego ha decrecido notablemente durante los últimos años tanto por cambios en la cantidad y la frecuencia de las lluvias como por las mayores demandas de agua para usos municipal e industrial. En la región es común encontrar zonas con niveles freáticos superficiales y aguas de buena calidad que pueden aportar hasta el 40-50% de los requerimientos de agua de la caña. Por consiguiente, en la programación de los riegos por balance hídrico es necesario tener en cuenta el aporte de agua freática.

El objetivo de la presente publicación es propender a la disminución de los costos del riego en caña de azúcar mediante la adopción del balance hídrico para la programación de los riegos, la medición del agua de riego por medio del aforador RBC y la aplicación del riego utilizando tecnologías como el surco alterno y los politubulares o la tubería rígida con compuertas. Todo esto complementado con el manejo y la conservación de las fuentes de agua, el conocimiento de las relaciones suelo-agua-planta-atmósfera y la aplicación de la zonificación climática regional por balance hídrico como herramienta clave para el desarrollo sostenible de la agricultura específica por sitio.

En cuanto al balance hídrico se presentan varias alternativas para implementarlo, que difieren en su grado de adaptación a las condiciones propias de los diferentes ingenios y cultivadores de caña de azúcar. En nuestro medio, el nivel de adopción del balance hídrico como una herramienta de programación de los riegos es bajo; razón por la cual CENICAÑA investiga y transfiere alternativas para su adopción comercial.

El balance hídrico es considerado como una tecnología útil para ahorrar agua. Sin embargo, es necesario aclarar que solamente se trata de un método que nos acerca al manejo racional del agua y, como tal, en años secos puede indicar que debemos regar más y en años húmedos, que reguemos menos. Desde luego, cuando la costumbre es aplicar un número excesivo de riegos, el uso del balance hídrico resulta en una economía inmediata de agua.

La información presentada en este documento es, en su mayor parte, el resultado de las investigaciones cooperativas adelantadas entre CENICAÑA, los ingenios azucareros y los cultivadores de caña en el valle del río Cauca, y no necesariamente representa el estado actual del manejo del agua en las plantaciones comerciales de caña de azúcar en la región.

Sistema suelo-agua

El suelo corresponde al manto superficial de la corteza terrestre que ofrece nutrientes, anclaje mecánico a las plantas y sirve como medio de almacenamiento de agua para los seres vivos. La importancia del suelo como un reservorio de agua no siempre es bien apreciada. El suelo puede ser descrito como un medio poroso en donde la parte sólida está integrada por partículas minerales y por materiales orgánicos provenientes de la descomposición de los residuos vegetales y animales. El espacio poroso ocupa entre el 40% y 60% del volumen total del suelo, donde se almacenan el agua, el aire y algunos gases del suelo. La mayor parte de la precipitación que cae sobre el suelo es absorbida y almacenada para regresar posteriormente a la atmósfera por transpiración a través de las hojas de las plantas y por evaporación directa desde la superficie del suelo y las masas de agua.

Un suelo normal en el valle del río Cauca puede almacenar alrededor de 4000 m³/ha de agua (400 mm) en los primeros 100 cm de profundidad; aproximadamente el 50% de esta cantidad puede ser extraída como agua aprovechable por las plantas. De esta manera, el suelo actúa como un reservorio de agua para las plantas que permite almacenar la lluvia o el agua de riego.

El sistema suelo-agua juega un papel esencial como parte del ciclo hidrológico y, hacia el futuro, la supervivencia del hombre puede depender en mayor escala de la calidad del agua que de la misma disponibilidad.

Siempre se ha visto al sector agrícola como uno de los mayores consumidores de agua; por lo tanto, es interesante comparar las necesidades de agua de una persona con las de las plantas. En promedio, se ha encontrado que una persona necesita 190 litros/día para cubrir todas sus necesidades en el hogar. Esta cantidad es equivalente a la consumida en 65 m² de un cultivo de caña que anualmente podría producir alrededor de 100 kg de azúcar. La disponibilidad futura de agua dependerá de la eficiencia de su uso, en todos los órdenes.

El agua en el suelo

Los suelos están integrados por partículas minerales que varían en tamaño y proporción, y normalmente se han clasificado como arenas, limos y arcillas. En suelos donde predominan las partículas minerales de mayor tamaño, como las arenas, se originan las clases texturales de los suelos arenosos y gravillosos; mientras que en suelos donde predominan las partículas coloidales de arcilla se obtienen las texturas arcillosas. Los suelos francos presentan una mezcla de igual proporción de arcillas, limos y arenas que inducen características intermedias entre la textura arenosa y la arcillosa. La materia orgánica actúa como un agente aglutinante que ayuda para que las partículas individuales se agrupen formando agregados dentro de los cuales existen espacios vacíos donde se almacenan el agua y el aire del suelo.

La forma como se agrupan las partículas del suelo da origen a grupos estructurales conocidos como: laminar, prismático, bloques cúbicos y subangulares, y esferoidal en el caso de terrones pequeños en forma de gránulos. El manejo inadecuado de los suelos puede conducir a cambios estructurales que influyen sobre la cantidad y el movimiento del agua, la transferencia de calor, el flujo de aire, la densidad aparente, la porosidad y la distribución de los poros.

La textura y la estructura del suelo son propiedades que en conjunto determinan la capacidad de almacenamiento de humedad, la disponibilidad, entrada y movimiento del agua dentro del suelo; así mismo, determinan la capacidad potencial de nutrimento para la plantas. Cada uno de los factores anteriores está ligado directa o indirectamente al tamaño y la distribución del espacio poroso y a las fuerzas de atracción entre los sólidos y la humedad del suelo.

Los suelos arenosos presentan poros de tamaño individual relativamente grande pero con un volumen total bajo de poros, dando como resultado baja capacidad de almacenamiento de agua. Estos suelos es necesario regarlos con frecuencia para evitar que el cultivo sufra por déficit de humedad, especialmente en los períodos secos.

Los suelos arcillosos, comunes en el valle del río Cauca, presentan gran cantidad de poros muy pequeños que dan origen a una alta capacidad de almacenamiento de humedad; consecuentemente, los riegos se requieren con menor frecuencia en los suelos arcillosos que en los arenosos.

Los suelos francos presentan características de almacenamiento de humedad intermedias entre los suelos arenosos y arcillosos; lo cual representa ventajas desde el punto de vista de almacenamiento y disponibilidad de agua para las plantas.

Mecanismos de retención de humedad

El agua en el suelo es retenida en primera instancia por fuerzas derivadas de las interfases sólido-agua que corresponden a mecanismos resultantes de la carga electrostática de las partículas y de su interacción con los iones absorbidos. La molécula de agua se comporta como una partícula dipolar al presentar una orientación que está determinada por la magnitud del campo eléctrico. Esta característica de la molécula de agua le permite actuar como uno de los mejores solventes naturales. En el proceso de hidratación, la arcilla seca entra en contacto con el agua y se produce una interacción entre las moléculas de agua y la superficie de la arcilla. Algunas de las moléculas de agua pueden ser absorbidas por la superficie de la arcilla lo que produce la hidratación de los cationes intercambiables; de esta manera se completa la capa superficial de agua sobre la arcilla y más capas de agua se asocian con la superficie de la micela coloidal. Es así como se producen las fuerzas de atracción de los sólidos por el agua y del agua por los sólidos, que dan origen a las fuerzas de adhesión.

El mecanismo más importante por medio del cual el suelo retiene la mayor parte del agua se deriva de las superficies de contacto o meniscos de agua que se forman en la interfase agua-aire. En un suelo normal no existen orificios capilares de tamaño y diámetro uniformes debido a la forma irregular de las partículas; de hecho, los poros se presentan como un laberinto interconectado conocido con el nombre de “espacio poroso del suelo”. Para entender la forma como el agua es retenida a nivel de la interfase agua-aire, los poros individuales del suelo se han simplificado y asemejado al comportamiento de un tubo capilar cuando entra en contacto con una superficie de agua libre. El agua asciende hasta encontrar una altura de equilibrio que es equivalente a la fuerza de retención del agua dentro del tubo capilar. Por esta razón normalmente se habla en términos de presión o succión capilar.

La magnitud de la fuerza de retención está ligada inversamente con el radio de curvatura del menisco de agua. Al disminuir la cantidad de agua almacenada en el suelo, el agua se va confinando hasta formar meniscos más

pequeños en donde la fuerza de retención llega a ser tan alta que las plantas no la pueden extraer y se marchitan.

Las fuerzas de cohesión de las moléculas de agua entre sí y la adhesión del agua a los sólidos del suelo dan origen a la tensión superficial, que resulta en la formación de los meniscos o superficies curvas en la interfase agua-aire.

El agua en el suelo está sometida a presiones negativas y por consiguiente la energía del agua en el suelo también es negativa; hecho que se pone de manifiesto por el trabajo que deben realizar las plantas para extraer la humedad del suelo. El concepto anterior se puede explicar también a partir de las fuerzas matriciales, las fuerzas osmóticas y otras fuerzas inherentes al sistema suelo-agua que impiden que el agua asociada con el suelo pueda realizar un trabajo similar al de una masa equivalente de agua libre en la misma posición de referencia. En consecuencia, el potencial del agua es negativo cuando el suelo no está saturado.

La energía potencial del agua expresa la capacidad relativa del agua en el suelo para realizar trabajo; y como tal, se puede identificar fácilmente la dirección del flujo del agua. Cuando dos suelos con el mismo contenido de humedad se ponen en contacto, el agua fluirá de la zona de mayor potencial hacia donde el potencial es menor, y el flujo de agua cesará cuando los dos potenciales se igualen. Normalmente, los potenciales se expresan por unidad de peso en términos de la altura de una columna de agua; por unidad de volumen en términos de unidades de presión como dinas/cm², bar, atmósferas y pascales; y como trabajo por unidad de masa (ergios/g, joules/kg).

Agua aprovechable (AA)

El manejo del suelo como un reservorio donde se almacena agua que posteriormente utilizan las plantas implica la definición de una capacidad máxima y una capacidad mínima de almacenamiento de humedad. Durante el proceso de humedecimiento del suelo, teniendo como fuente de agua la precipitación o el riego, se puede observar que con la entrada de agua en el suelo (infiltración) ocurre un desplazamiento de aire y el suelo se va humedeciendo a medida que los poros se llenan de agua (Figura 1).

Cuando todos los poros están llenos de agua se dice que el suelo está “saturado”; en ese momento las fuerzas de retención son nulas y el valor del potencial mátrico es igual a cero. Después de un riego o lluvia viene el proceso

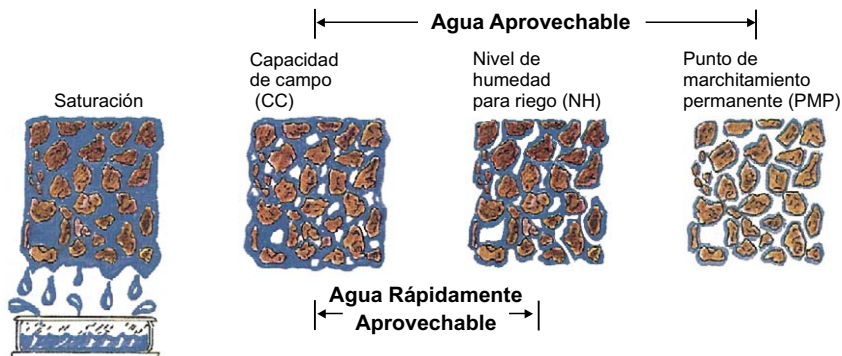


Figura 1. Representación gráfica de las constantes de humedad del suelo, el agua aprovechable y el agua rápidamente aprovechable (adaptado de: Buckman, H.O.; Brady, N.C. 1996. *The Nature and Properties of Soil*).

de redistribución, inicialmente con predominio de la fuerza de gravedad que obliga a la salida del agua de los macroporos; en ese momento se obtiene un valor de humedad conocido como capacidad de campo (CC). Generalmente se ha tomado como capacidad de campo el contenido de humedad que retiene un suelo bien drenado entre uno o dos días después del riego, cuando prácticamente ha cesado el flujo de agua gravitacional; el potencial mátrico en ese momento corresponde a un valor que oscila entre -10 y -33 kilopascales (kPa) (-0.10 a -0.33 bars), dependiendo de la textura del suelo. El valor de capacidad de campo es considerado como el límite superior de la capacidad de almacenamiento de humedad del suelo.

A medida que las plantas consumen la humedad del suelo, el agua se va confinando en los poros más pequeños. Existe un límite inferior de almacenamiento donde las plantas no pueden tomar suficiente humedad y se marchitan; por lo tanto, es necesario aplicar los riegos antes de alcanzar el contenido de humedad de marchitamiento para no afectar el desarrollo ni la producción del cultivo. Este límite inferior de la humedad aprovechable se conoce con el nombre de punto de marchitamiento permanente (PMP). Este contenido de humedad está asociado con un potencial mátrico de -1500 kPa (-15 bars).

El contenido de humedad del suelo no es el mejor criterio para describir la disponibilidad de humedad para las plantas; sin embargo, es un valor muy útil para determinar los requerimientos de agua y el manejo del riego a escala comercial.

La disponibilidad de humedad para las plantas comúnmente 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 (CC) y punto de marchitamiento permanente (PMP).

Lámina de agua rápidamente aprovechable (LARA)

Existe controversia acerca de la disponibilidad de humedad para las plantas en el rango entre capacidad de campo (CC) y punto de marchitamiento permanente (PMP). Se conocen algunas especies vegetales que pueden extraer humedad a niveles inferiores al PMP, pero la mayoría de las especies cultivables reducen su crecimiento cuando el contenido de humedad en el suelo se acerca a este punto. Con contenidos de humedad cercanos a la CC el agua es tomada fácilmente y la planta puede transpirar a su capacidad potencial; mientras que en la medida que el agua aprovechable en el suelo se reduce, el agua es retenida con mayor fuerza y las plantas deben realizar un esfuerzo mayor para extraerla. En ese momento la evapotranspiración ocurre a una tasa inferior a la potencial, la cual es conocida como evapotranspiración actual (Et). Dentro de este rango de disponibilidad de humedad existe un punto crítico a partir del cual la tasa de crecimiento de los tallos se afecta, identificado como el nivel crítico de humedad (NH). Como regla general, el punto de referencia para aplicar los riegos se ha tomado cuando se consume el 50% del agua aprovechable.

El agua almacenada por el suelo entre la CC y el NH se conoce como el agua rápidamente aprovechable (ARA); cuando este valor se expresa en términos de lámina, se denomina lámina de agua rápidamente aprovechable (LARA) (Figura 1).

A partir de 1980 CENICAÑA inició la determinación de las características hídricas de los suelos más representativos del valle del río Cauca (Cuadro 1). La información recopilada indica que, en su mayoría, los suelos 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 que varía entre 1 y 2 milímetros de agua por cada centímetro de profundidad en el perfil del suelo.

Cuadro 1. Lámina de agua rápidamente aprovechable (LARA) y valores para las marcas del tanque Cenírrómetro en los suelos más representativos del valle del río Cauca.

Suelo	Orden	Textura*	LARA ₁ 2-4 meses (mm)	LARA ₂ más de 4 meses (mm)	Marcas del Cenírrómetro**	
					EVC ₁ =0.37 x LARA ₁ (cm)	EVC ₂ =0.16 x LARA ₂ (cm)
Argelia (AR) Vertic-Haplustoll	Alfisols	FAr-Ar	50	60	19	10
Bengala (BN) Vertic-Eutropept	Inceptisols	F-Ar	55	75	20	12
Burriá (BU) Typic-Pelludert	Vertisols	Ar	45	70	17	11
Canelo (CL) Tropic Fluvaquent	Entisols	FAr	50	70	19	11
Coke (CK) Fluvaquentic- Ustropept	Inceptisols	FAr-Ar	55	75	20	12
Esneda (ES) Typic.Pelludert	Vertisols	Ar	50	70	19	11
El Comercio (EC) Typic Ustropept	Inceptisols	FA	45	65	17	10
Florida (FL) Entic-Haplustoll	Mollisols	FAr-A	45	65	17	10
Galpón (GL) Typic-Pelludert	Vertisols	Ar-FAr	45	70	17	11
Galponera (GR) Typic-Pelludert	Vertisols	Ar	45	70	17	11
Guadualito (GU) Fluvaquentic- Haplustoll	Mollisols	FAr-A	55	75	20	12
Herradura (HE) Udic-Pellustert	Vertisols	Ar-FArL	50	70	19	11
Japio (JP) Fluvaquentic- Humitropic	Inceptisols	F-FAr	50	70	19	11
Juanchito (JN) Vertic-Tropic- Fluvaquent	Entisols	Ar-FAr	50	70	19	11
La Teta (LT) Fluventic-Distropept	Inceptisols	F-FAr	50	70	19	11
Líbano (LB) Entic-Haplustoll	Mollisols	FA	55	75	20	12
Manuelita (MN) Fluventic-Haplustoll	Mollisols	FAr-FA	55	75	20	12

Continúa

Cuadro 1. Continuación.

Suelo	Orden	Textura*	LARA ₁ 2-4 meses (mm)	LARA ₂ más de 4 meses (mm)	Marcas del Cenirrómetro**	
					EVC ₁ =0.37 x LARA ₁ (cm)	EVC ₂ =0.16 x LARA ₂ (cm)
Marruecos (MA) Vertic-Tropequept	Inceptisols	FArA-Ar	50	70	19	11
Nima (NM) Entic-Haplustoll	Mollisols	FAr-A	45	65	17	10
Palma Sola (PO) Vertic Tropequept	Inceptisols	Ar	50	70	19	11
Palmaseca (PS) Petrocalcic- Natrustalf	Alfisols	F-FAr	50	70	19	11
Palmeras (PM) Vertic-Ustrophept	Inceptisols	F-Ar	50	80	19	13
Palmira (PL) Pachic-Haplustoll	Mollisols	F-Ar	50	70	19	11
Palmirita (PT) Cumulic-Haplustoll	Mollisols	FA-FAr	50	70	19	11
Piedras (PI) Udorthentic Chromustert	Vertisols	Ar	45	70	17	11
Pradera (PR) Vertic-Ustrophept	Inceptisols	FA-FAr	50	75	19	12
Pto.Tejada (PJ) Vertic-Tropequept	Inceptisols	F-FAr	50	70	19	11
Ricaurte (RT) Vertic-Ustrophept	Inceptisols	Ar-FArL	50	75	19	12
Río Cauca (RC) Fluvaquentic- Haplustoll	Mollisols	FL-Ar	55	70	20	11
Río La Paila (RL) Fluventic-Haplustoll	Mollisols	FA-FAr	55	75	20	12
Río Palo (RO) Fluventic-Hapludoll	Mollisols	FL-Ar	55	75	20	12
San Julián (SS) Typic-Tropudult	Ultisols	FAr-Ar	45	60	17	10
San Fernando (SF) Tropic Fluvaquent	Entisols	FA-FL	45	65	17	10
Sauce (SC) Typic Ustifluent	Entisols	FL	50	70	19	11

* A: arenosa; Ar: arcillosa; F: franca; L: limosa.

** EVC: distancia (cm) entre el orificio vertedero de excesos y las marcas de control del tanque Cenirrómetro que indican la necesidad de riego según la edad del cultivo

Evaluaciones directas del patrón de crecimiento y la distribución de las raíces de la caña realizadas en el campo mostraron que en los primeros 40 centímetros del suelo superficial se concentran entre 85% y 92% de las raíces de la caña (Domínguez y Torres, 1995). Por consiguiente, para calcular la lámina de agua aprovechable se puede tomar una profundidad radical de 60 cm antes de los 4 meses de edad del cultivo que corresponde al período inicial de desarrollo, y de 80 cm para el período de rápido crecimiento (4 a 10 meses). Sin embargo, en suelos con factores limitantes para el desarrollo de raíces por la presencia de capas compactadas, pedregosas o de nivel freático, se debe ajustar la profundidad radical. La aplicación de los riegos suplementarios depende de la precipitación y se recomienda hacerla cuando se consuma entre el 40% y el 60% del agua aprovechable. El factor de agotamiento del 40% se utiliza en suelos arcillosos que se agrietan.

Sistema planta-agua

Absorción de agua

El sistema radical de las plantas no solamente sirve como medio de anclaje en el suelo sino también como un medio eficaz para la absorción de nutrientes y agua. La absorción de agua se realiza en la epidermis de la raíz y especialmente en los pelos absorbentes, desde donde el agua pasa a través de las células corticales al tejido del xilema, encargado de transportar la savia bruta hasta las hojas para ser usada en el proceso de fotosíntesis.

Durante las horas de alta demanda evaporativa de la atmósfera, el agua en el suelo que circunda las raíces se absorbe tan rápidamente que se agota. En ese momento el flujo de agua desde el suelo hacia la raíz depende del gradiente hidráulico entre el suelo y la parte exterior de la raíz y de la conductividad capilar del suelo. Las plantas también pueden elongar sus raíces para entrar en contacto con el suelo húmedo, algunas entre 3 y 60 mm por día.

Transpiración

La mayor parte del agua absorbida por las plantas es liberada a la atmósfera en forma de vapor y solamente entre 1% y 2% es utilizada para la formación de los tejidos.

La fotosíntesis es un proceso que ocurre en las hojas de las plantas y que en presencia de la energía solar permite combinar el anhídrido carbónico (CO_2) con el agua para producir carbohidratos. En la epidermis de las hojas se encuentran unos pequeños orificios denominados estomas que se cierran y abren dependiendo de la luminosidad y disponibilidad de agua en la hoja. La cutícula foliar es impermeable al agua y al CO_2 ; por consiguiente, el vapor de agua y otros gases de intercambio entre la hoja y la atmósfera deben pasar a través de los estomas. El aparato estomático incluye el orificio del estoma y las células de guardia.

La absorción de CO_2 desde la atmósfera se realiza por difusión a través de la pared celular en el interior de la hoja, para lo cual es necesario que el CO_2 entre primero en la hoja por difusión. El tejido interno de la hoja o empalizada está formado por las células esponjosas del mesófilo, donde el agua se evapora formando un ambiente saturado de agua que se comunica con la atmósfera exterior cuando están abiertos los estomas. La absorción de CO_2 para la fotosíntesis es un proceso que necesariamente va acompañado por la pérdida de agua en forma de vapor por transpiración.

Se plantea entonces un dilema sobre cómo maximizar la producción de los cultivos aplicando la menor cantidad de agua de riego. Para optimizar la absorción de CO_2 se necesita que los estomas estén completamente abiertos, hecho que permite al mismo tiempo una mayor pérdida de agua por transpiración. La apertura de los estomas está controlada por la disponibilidad de agua en el suelo y por factores ambientales que controlan los procesos de difusión y evaporación.

Evapotranspiración (Et)

El consumo total de agua de la caña varía considerablemente entre los diferentes países cañicultores debido a diferencias en los ciclos de cultivo. Por lo general, el consumo de agua por año oscila entre 1200 y 1500 mm, registrando los mayores valores en las zonas subtropicales donde el verano es intenso y por consiguiente la demanda evaporativa de la atmósfera es mayor que en el trópico.

El consumo diario de agua de una planta es conocido también como evapotranspiración o uso consuntivo y corresponde al proceso combinado del agua perdida por evaporación directa desde la superficie del suelo y la absorbida por las raíces, que posteriormente se pierde casi en su totalidad

por transpiración a través de la superficie de las hojas. La evapotranspiración es afectada por factores del suelo, la planta y el clima. Cuando el contenido de humedad del suelo es alto, las plantas pueden transpirar a su máxima capacidad; en ese momento la evapotranspiración obtenida se conoce como evapotranspiración potencial (Etp). Se han registrado valores máximos de Etp que varían entre 3.7 mm/día en Colombia y 15.7 mm/día en Ayr, Australia.

El valle del río Cauca está ubicado en el trópico a 3° de latitud norte, con una altitud media de 1000 metros sobre el nivel del mar, y las fluctuaciones mensuales de la temperatura, el brillo solar y la evaporación (Ev) son pequeñas. En las zonas subtropicales de Argentina, Sudáfrica y Australia los cultivos están cerca al nivel del mar y durante el verano la temperatura es alta; por consiguiente, la demanda evaporativa es mayor y se pueden registrar valores diarios de evapotranspiración entre 7 y 15 mm/día.

En las condiciones de campo de los cultivos comerciales la humedad del suelo es variable y puede bajar hasta niveles intermedios entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente. En esos casos la planta evapotranspira a una tasa inferior a la potencial, la cual es conocida como evapotranspiración actual (Et) y se utiliza para asignar 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 hay 100% de cobertura vegetal la evaporación desde el suelo es mínima y el cultivo pierde agua esencialmente por transpiración.

Experimentos realizados por CENICAÑA en las condiciones ambientales del valle del río Cauca han permitido obtener valores de Et de 2.1 mm/día para el período de macollamiento (2 a 4 meses) y de 3.1 mm/día para el período de rápido crecimiento (4 a 10 meses). Experimentos de evapotranspiración realizados en lisímetros de percolación con la plantilla y dos socas de las variedades CP 57-603 y MZC 74-275 han permitido encontrar que los requerimientos de agua de la caña de azúcar oscila entre 1050 y 1300 mm por un ciclo de cultivo de 13 meses.

En el valle del río Cauca se encontró una relación lineal muy estrecha entre la Et y la Ev (Figura 2), hecho que permite calcular la Et a partir de la evaporación medida en un tanque Clase A (USWB: *United States Weather Bureau*). Una vez estimado el valor de Et, se puede fácilmente implementar la programación de los riegos por el método del balance hídrico.

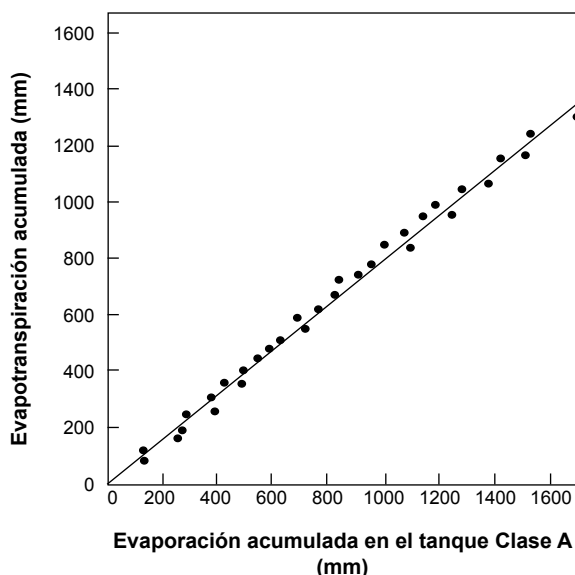


Figura 2. Relación entre la evapotranspiración de la caña y la evaporación medida en el tanque Clase A.

Requerimientos de riego

Los requerimientos de agua de la caña de azúcar varían de acuerdo con la etapa de crecimiento del cultivo y con la distribución y cantidad de las lluvias. En el valle del río Cauca la cantidad de lluvia oscila entre 800 y 2600 mm/año.

El período vegetativo de la caña puede ser dividido en tres etapas, que incluyen: (a) un período de germinación y macollamiento (0 a 4 meses), (b) rápido crecimiento (4 a 10 meses) y (c) maduración (10 a 13 meses). La anterior descripción de las etapas de desarrollo de la caña se adapta bien a variedades tempranas. En variedades de período vegetativo largo (15 a 16 meses) la etapa de macollamiento se alarga hasta los 7-8 meses; viene luego la etapa de rápido crecimiento (9 a 13 meses) y por último la etapa de maduración.

En los primeros estados del cultivo las plantas están pequeñas y los requerimientos de agua son bajos. Durante el período de germinación y macollamiento las socas de caña presentan bajos consumos de agua y los riegos se pueden reducir al máximo sin afectar la producción de caña y azúcar.

En el curso inicial del período de rápido crecimiento (4 a 7 meses) las plantas son muy susceptibles a los déficits de humedad; experimentalmente se ha encontrado un gran efecto del déficit en la producción final, cuando se ha limitado el suministro de agua en este período. Los requerimientos de agua y nutrientes son altos y por consiguiente el cultivo no se debe someter a déficit de humedad.

El crecimiento de la caña se reduce en el período de maduración y la planta concentra azúcares en los tallos; por consiguiente, es recomendable restringir los riegos y evitar las aplicaciones tardías de nitrógeno para no estimular nuevamente el crecimiento y evitar así la cosecha de cañas con bajos contenidos de sacarosa.

Los experimentos sobre requerimientos de agua han permitido obtener valores de corrección para convertir la evaporación del tanque Clase A en evapotranspiración:

$K = 0.3$ para el período de 2 - 4 meses

$K = 0.7$ para el período de rápido crecimiento (4 a 10 meses).

Se recomienda suspender los riegos después de los 10 meses para variedades que se cosechan entre 12 y 13 meses de edad.

En las plantaciones comerciales del valle del río Cauca es común encontrar niveles freáticos superficiales que pueden aportar hasta el 60% de los requerimientos de agua de la caña. En campo se ha comprobado que es posible controlar la posición del nivel freático entre 100 y 120 cm sin reducir la producción de caña y azúcar. Un nivel freático superficial con aguas de buena calidad puede aportar entre 40% y 60% de los requerimientos de agua de la caña. El aporte de agua capilar reduce la cantidad de agua que se necesita aplicar como riego. Estudios realizados en zonas con nivel freático alto indican que para el período de rápido crecimiento se puede reducir el valor de K de 0.7 a 0.5 a fin de incluir el aporte de agua capilar a partir del nivel freático.

La curva de consumo de agua de la caña es continua y va creciendo con la edad hasta llegar a valores altos en el período de rápido crecimiento, para luego decrecer durante el período de maduración. Los riegos se vienen programando de manera satisfactoria con un $K=0.3$ para el período de germinación y macollamiento y $K=0.7$ para el período de rápido crecimiento. CENICAÑA adelanta investigaciones para definir la curva continua de K de las variedades comerciales con el fin de mejorar la precisión en la estimación

de los requerimientos de riego. En una investigación realizada entre 1995 y 1997 se encontró que en la variedad MZC 74-275 sembrada en un suelo moderadamente profundo, imperfectamente drenado y de fertilidad mediana, donde la precipitación anual es de 1100 a 1200 mm (zona agroecológica 8C0), los valores de K para programar los riegos son: $K=0.3$ de 2 a 4 meses, $K=0.5$ de 4 a 6 meses y $K=0.7$ de 6 a 10 meses (CENICAÑA, 1997).

Los riegos de la caña en el valle del río Cauca son de carácter suplementario debido a que la precipitación natural no es suficiente o su distribución no es adecuada para satisfacer los requerimientos de agua de la caña. Durante la última década se han presentado períodos secos en meses tradicionalmente húmedos, situación que exige la programación de los riegos por balance hídrico como una garantía para contrarrestar aquellos períodos secos que pueden afectar la producción y la rentabilidad del cultivo.

Fuentes, manejo y medición del agua

Fuentes de agua

El agua para el riego de la caña de azúcar proviene principalmente de aguas superficiales y subterráneas. Las aguas superficiales se captan de ríos y quebradas cuyo caudal disminuye considerablemente durante los períodos secos; por este motivo es necesario recurrir a fuentes más confiables como el agua subterránea. Algunos ingenios localizados en la parte norte del valle del río Cauca, donde los acuíferos no son tan ricos como en las partes centro y sur, están recurriendo a la captación por bombeo desde el río Cauca. Este río mantiene un caudal base entre 80 y 130 m³/s durante los períodos secos, el cual es regulado por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) por medio de la represa Salvajina.

En el valle del río Cauca predominan tres unidades litológicas: la unidad A presenta una profundidad entre 50 y 100 m en promedio y en la actualidad está sobreexplotada, lo que obliga a la perforación de la unidad B que tiene un espesor de 80 metros. Esta unidad actúa como estrato confinante superior de la unidad C, con profundidad mayor a los 190 metros, y corresponde al acuífero más rico cuya explotación se inició desde hace unos 13 años.

En 2003 la región contaba con un total de 1573 pozos activos: 1076 para uso agrícola, 265 para uso industrial y 232 para uso urbano. La capacidad total de extracción de agua subterránea era de 133 m³/s, con el 85% de los pozos concentrados en las partes centro y sur del valle. El rendimiento de los pozos para riego ha pasado de 100 y 120 l/s a valores actuales entre 70 y 80 l/s, con niveles dinámicos de bombeo entre 40 y 45 m. Según información de la CVC, el nivel de bombeo se está profundizando a razón de 6-8 m cada 10 años. Los pozos de agua para riego se operan en promedio durante 3400 horas/año, de donde resultan volúmenes bombeados de 1300x10⁶ m³/año. La recarga anual de los acuíferos regionales es del orden de 3400x10⁶ m³, valor superior al volumen extraído de 1500x10⁶ m³/año.

Los pozos perforados entre Santander de Quilichao y el río Sonso, con profundidades superiores a los 40 m, presentan aguas de buena calidad química y bacteriológica. Las aguas subterráneas del valle son ricas en calcio y magnesio provenientes de las rocas diabásicas de la cordillera Central. Las zonas ubicadas dentro de la planicie de inundación del río Cauca presentan altos contenidos de sulfatos. El sodio se encuentra presente a lo largo de los ríos Párraga y Amaime.

Manejo del agua

En nuestra región el riego es necesario para suplir los déficits de humedad que ocurren en los períodos secos, siendo una operación costosa que requiere personal calificado.

La selección del sistema de riego se debe basar en: tipo de suelo, velocidad de infiltración, profundidad radical, topografía, disponibilidad de agua y mano de obra y factores financieros. Con el riego por aspersión se pueden alcanzar eficiencias de aplicación entre 80% y 85%, y se requiere una inversión inicial de capital alta en los sistemas de distribución y aplicación más el costo de la mano de obra, la operación y el mantenimiento de los equipos. Para el riego por superficie el costo de instalación es menor; la eficiencia de aplicación de este sistema en la región varía entre 30% y 60%.

La fuente de agua para riego la constituyen los arroyos, lagos, ríos y, en un alto porcentaje, las aguas subterráneas. Una práctica común es construir reservorios para almacenar el agua superficial o el agua extraída de los pozos durante la noche. Al almacenar el agua durante la noche, al día siguiente se

dispone del caudal almacenado más el obtenido de la fuente superficial o por el bombeo directo realizado durante el día; de esta manera se logra regar un área mayor. El agua se deriva de las fuentes superficiales por toma directa o por bombeo para luego ser conducida a los campos por medio de canales abiertos o tuberías que tienen capacidad entre 300 y 1200 l/s.

El agua para riego por gravedad se entrega a los surcos por medio de cortes o boquetes abiertos en las paredes del canal o mediante el uso de sifones o tubos cortos que entregan un caudal regulado a cada uno de los surcos. Las acequias de riego son construidas en tierra con secciones trapezoidales y una capacidad de conducción entre 100 y 120 l/s. Una diferencia de 5-10 cm entre el nivel del agua en la acequia de riego y la cabecera del surco permite derivar entre 2 y 6 l/s usando sifones de 5 a 10 cm de diámetro.

En los últimos años se han venido usando con mucho éxito las mangueras de polietileno (politubulares) y la tubería rígida con compuertas para reemplazar las acequias de riego, con reducciones de 400 a 600 m³/ha en los volúmenes de agua utilizados por cada riego, mayor uniformidad de los caudales aplicados por surco y mejoras en la eficiencia del regador. Además, el diseño de los campos para la cosecha mecanizada implica eliminar las acequias de riego y construir acequias de drenaje en forma de batea para facilitar el desplazamiento de las cosechadoras y del equipo de transporte de caña.

La longitud de los surcos es una función de la pendiente del campo, la velocidad de infiltración, el caudal aplicado por surco y el tiempo de avance del agua. Los suelos del valle del río Cauca, en su mayoría, presentan alta velocidad de infiltración y las longitudes de los surcos han sido fijadas entre 120 y 150 m. Cuando la velocidad de infiltración es alta (superior a 30 mm/h) es necesario considerar surcos cortos con caudales de 4 a 6 l/s por surco y así reducir las pérdidas de agua por percolación. En campos con velocidades de infiltración media a baja (10 a 30 mm/h) el caudal aplicado por surco debe ser menor (2 a 4 l/s) y los surcos deben ser más largos para obtener un mayor tiempo de contacto del agua con el suelo. En suelos muy compactos o con estructura masiva la velocidad de infiltración puede ser inferior a 5 mm/h y es necesario recurrir al riego por goteo.

En el valle, el riego por surcos se aplica solamente durante la fase de avance, cortando el suministro de agua un poco antes de que el frente de avance llegue al final del surco. Esta forma de regar permite reducir las pérdidas por escorrentía y percolación profunda, sacrificando en parte la

uniformidad de la aplicación del 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 riego requerido es de carácter suplementario. Las lluvias tropicales pueden compensar la baja uniformidad de distribución del agua a lo largo del surco.

En general, la eficiencia de aplicación del riego por surcos es del 30-60%. Una buena estrategia probada experimental y comercialmente en el valle del río Cauca es el riego por surco alterno, con el cual se aumenta la eficiencia de aplicación del agua entre 30% y 60% y la del regador de 1.2 a 2.5 ha en 12 horas de trabajo sin reducir la producción de caña y azúcar (Torres; Cruz; Villegas; 1997). En el Cuadro 2 se muestran las mediciones de los volúmenes de agua aplicados durante tres eventos de riego en plantilla y dos socas en un suelo del orden Inceptisols. Durante el primer riego no se encontraron diferencias entre el volumen de agua aplicado por surco continuo y por surco alterno. A partir del segundo y tercer riegos se observaron reducciones entre 10% y 48% en el consumo de agua al aplicar riego por surco alterno.

Durante el período inicial de desarrollo de la caña plantilla el surco se encuentra muy disturbado debido a las prácticas intensivas de preparación del suelo realizadas para la siembra. Después del primer riego ocurre un proceso de compactación natural que reduce la velocidad de infiltración y hace posible el uso del riego por surco alterno. El manejo de los caudales para regar por surco alterno es similar al usado en el riego por surco continuo. Sin embargo, se ha observado que el tiempo de avance en el primer caso puede aumentar hasta en 30% cuando se aplica el mismo caudal usado para surco continuo. Si los tiempos de avance obtenidos son muy altos se debe incrementar el caudal para surco alterno entre 1 y 2 l/s por surco para obtener velocidades de avance del agua de 1.0 a 1.5 m/min.

Cuadro 2. Reducción en el consumo de agua (%) en aplicaciones de riego de levantamiento por surco alterno en comparación con riego por surco continuo en un Inceptisols.

Riego (no.)	Plantilla	Primera soca	Segunda soca
1	+1	-41	-31
2	-10	-37	-48
3	-46	-33	Sin dato

El riego por surco alterno exige el aporque de las plantas como condición necesaria para garantizar una buena distribución del agua a lo largo del surco e impedir que el agua de los surcos con riego se pase a los surcos sin riego. Se recomienda realizar el aporque con una altura entre 10 y 20 cm y conseguir entresurcos bien conformados de sección trapezoidal con un ancho en la parte inferior de 50-60 cm para facilitar el manejo y avance del agua.

En socas, la aplicación de agua está supeditada al encalle de los residuos de cosecha. En el encalle al 2x1 (dos calles limpias seguidas por una con residuos), durante las épocas secas el riego por surcos se realiza colocando el agua en los dos surcos libres de residuos. En el encalle al 4x1 (cuatro calles limpias seguidas por una con residuos), el agua se coloca en tres de las cuatro calles sin residuos.

El riego por aspersión en caña de azúcar en el valle del río Cauca se realiza principalmente utilizando cañones de 6 kg/cm² (85 psi) de presión y tubería portátil de aluminio de 5-6 pulgadas de diámetro o cañones de 9 kg/cm² (125 psi) de presión incorporados a la motobomba.

El riego por aspersión con cañones se recomienda especialmente para zonas de piedemonte y para la germinación y establecimiento del cultivo ya que permite aplicar láminas controladas de 30 mm. Es importante suministrar la cantidad precisa de agua que requiere la motobomba, bifurcar las líneas de tubería para garantizar la presión requerida por los aspersores y mantener los equipos en buen estado para obtener eficiencias de aplicación altas.

El riego por goteo es definido como la aplicación frecuente y lenta de agua a la zona específica en donde se encuentran las raíces de las plantas. El riego por goteo de la caña de azúcar es una tecnología ampliamente probada en Hawai, Australia, Sudáfrica y Mauricio. Las ventajas obtenidas al regar por goteo son: requerimientos de baja presión, ahorro de energía, bajos caudales requeridos, alta eficiencia de aplicación (>90%), ahorro de mano de obra, fertilización junto con el riego y reducción de la presencia de malezas; además permite el cultivo en suelos marginales de baja fertilidad y baja capacidad de retención de agua.

Entre las desventajas de este sistema se mencionan: altos requerimientos de mantenimiento, agua de alta calidad física y química y alta posibilidad de acumulación de sales en el suelo; además, el sistema es susceptible al taponamiento de los goteros y no permite el humedecimiento del tejido foliar. El riego por goteo se adapta bien a los cultivos en hileras y en muchas situaciones

la alta inversión requerida para la instalación no lo hace viable (entre 2000 y 2500 US\$/ha, precios del año 2003).

El riego por goteo de la caña se inició en Hawái en 1979, en donde actualmente cubre casi el 100% del área cultivada, y se está volviendo popular en aquellas regiones con disponibilidad baja de agua y mano de obra. CENICAÑA evaluó el riego por goteo entre los años 1993 y 1995 y encontró un ahorro de agua del 40% con respecto al surco alterno. Sin embargo, este ahorro no es suficiente para cubrir la inversión en el sistema de riego. Por tanto, se sugiere evaluar la viabilidad del sistema con instalaciones piloto en áreas pequeñas antes de realizar instalaciones de tamaño comercial. En condiciones de suelos de textura fina, con alta capacidad de retención de humedad, es necesario usar el riego por goteo como un sistema de frecuencia intermedia (6 a 7 días) para evitar problemas por saturación constante del suelo y posible taponamiento de los emisores con minerales en estado de reducción.

Medición del agua

El agua es un recurso costoso y en ocasiones los agricultores no disponen de la cantidad suficiente para atender las necesidades de riego. Para disminuir el costo del riego el primer paso es medir el agua utilizando estructuras de aforo en los canales de distribución y en los surcos; de esta forma se determinan los volúmenes de agua utilizados en cada campo y las cantidades de agua que se pierden, con el fin de tomar medidas para disminuir dichas pérdidas al mejorar la conducción y la aplicación del riego.

Generalmente se tienen estructuras de aforo en los sitios de captación de las aguas superficiales o a la salida de los pozos profundos. No obstante son pocas las estructuras de medición construidas en la red de distribución y, en la mayoría de los casos, el agua entregada a los campos se estima visualmente. Lo anterior impide cuantificar las pérdidas de agua que ocurren en el sistema de riego, lo que causa costos altos de la labor.

Una forma de afrontar los períodos de sequía es mejorando la eficiencia en el uso del agua de riego. Para lograr este objetivo es indispensable medir el caudal disponible en los canales.

En la actualidad existen un gran número de estructuras y mecanismos para medir el agua en los canales, que difieren tanto en precisión como en costo. Entre las estructuras más precisas, económicas, de fácil construcción

y lectura se encuentra el aforador RBC el cual deriva su nombre de la primera letra del apellido de los ingenieros John A. Replogle, Marinus G. Bos y Albert J. Clemmens.

Esta estructura corresponde a un aforador de cresta ancha, al cual se le coloca una rampa con una pendiente de 3:1 en la entrada para reducir el área de flujo y así provocar un resalto en la sección de control. El aforador se coloca en el fondo del canal (Figura 3), donde se debe definir: la altura de la rampa o cresta (S), la distancia horizontal desde la regla de aforo hasta la rampa (L_a), la longitud de la rampa (L_b) y la longitud de la cresta (L_c). La determinación de la altura del resalto debe hacerse con cuidado porque de ella depende el nivel del agua en el canal, aguas arriba de la estructura de aforo. La distancia desde la regla de aforo hasta la rampa (L_a) debe ser como mínimo equivalente a tres veces el tirante máximo medido sobre la cresta de la estructura. Así mismo, la longitud de la rampa (L_b) debe ser igual a tres veces la altura de la cresta (S), y la longitud de la cresta (L_c) corresponde a 1.5 veces el valor del

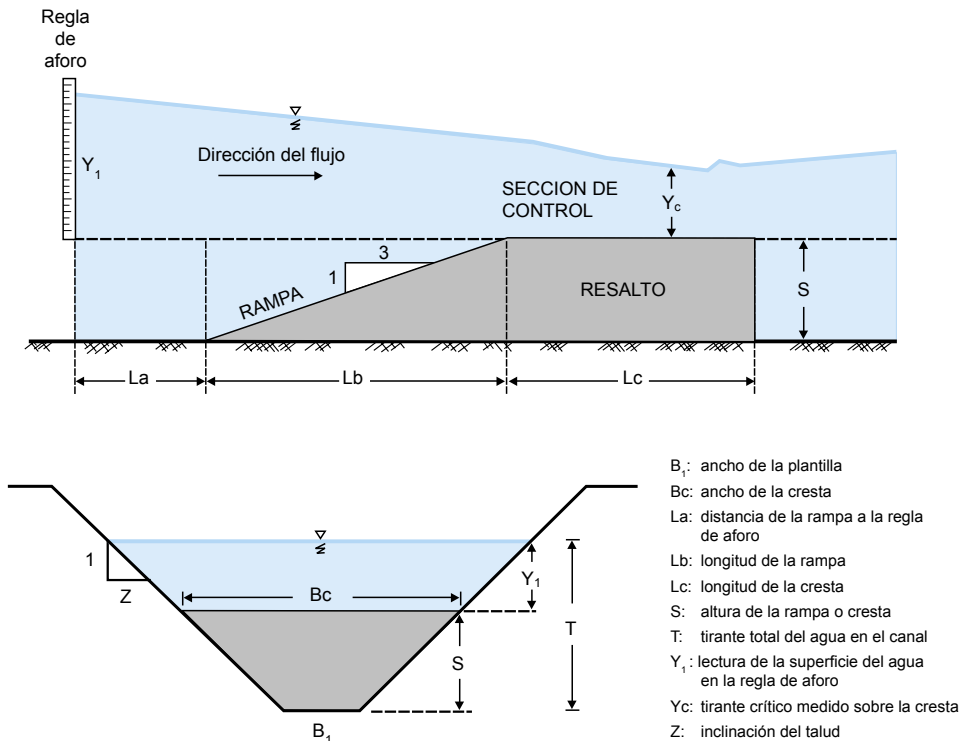


Figura 3. Descripción gráfica del aforador RBC para canales trapezoidales.

tirante máximo medido sobre la cresta. Se debe proporcionar un borde libre equivalente a 0.2 veces el tirante máximo.

Las estructuras de aforo en canales abiertos se deben instalar en tramos rectos del canal donde no existan entradas ni derivaciones de agua cercanas al sitio seleccionado. En este tramo el flujo del agua debe ser uniforme, es decir, no se deben presentar remolinos ni ondas en la superficie del agua. En el Cuadro 3 se relacionan las secciones trapezoidales más usadas para transportar agua en los cultivos de caña de azúcar; de acuerdo con el caudal transportado por el canal se recomienda una altura para la cresta del aforador. CENICAÑA ha desarrollado un programa de computadora que permite generar la curva de calibración para cualquier dimensión de un aforador RBC. Las tablas de calibración para las secciones consideradas en el Cuadro 3 se presentan en el Apéndice, página 63.

Cuadro 3. Secciones de canales trapezoidales comúnmente utilizados en el cultivo de la caña en el valle del río Cauca para el transporte de agua.

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

Nota: ver descripción gráfica de un canal trapezoidal en la Figura 3, página 20.

Programación de riegos

La programación de los riegos de la caña se venía realizando en la mayoría de los casos de manera empírica y sin tener en cuenta las relaciones suelo-agua-planta, lo cual involucra el riesgo de aplicar un número excesivo de riegos o someter el cultivo a déficits de humedad que pueden afectar la producción. La implementación de la programación de los riegos por balance hídrico en las regiones semihúmedas es más difícil que en las regiones secas debido a la posibilidad de recibir precipitación antes o después de la fecha programada del riego. Lo anterior casi siempre hace que el agricultor tenga una posición

de indiferencia con respecto a la necesidad de programar los riegos adecuadamente. La programación de los riegos está dirigida a dar respuesta a dos preguntas que afrontan los regadores en el campo: ¿cuándo regar?, ¿cuánto aplicar?

Para determinar el momento oportuno para la aplicación de los riegos se puede tomar la misma planta de caña como un indicador fisiológico. Es así como la apertura de los estomas, la temperatura de las hojas, el índice de humedad de Clements y la apariencia del cultivo han sido usados como una referencia para programar los riegos.

Los métodos más conocidos se basan en el seguimiento de la humedad del suelo por medio de la apreciación de la humedad al tacto, mediciones del potencial mátrico usando tensiómetros, determinaciones gravimétricas directas o indirectas con el uso de bloques de resistencia eléctrica, celdas de nylon y sonda de neutrones. Actualmente se cuenta con nuevos equipos como el TDR (*Time Domain Reflectometer*), el FDM (*Frequency Domain Meter*), el Diviner 2000 y tensiómetros de estado sólido. El uso de las anteriores metodologías implica lecturas periódicas de los parámetros de evaluación y, en algunos casos, equipos especializados y costosos que las hace poco atractivas para su uso en el campo.

En sus inicios, la programación de los riegos para la caña de azúcar a nivel mundial se realizaba con base en determinaciones gravimétricas, lecturas de tensiómetros y bloques de yeso; últimamente, los requerimientos de riego han sido estimados a partir de la evaporación del tanque Clase A. Los factores climáticos que afectan la evaporación del agua en una superficie de agua libre son los mismos que controlan la transpiración desde la superficie de las hojas, siempre y cuando exista en el suelo una buena disponibilidad de agua para la planta. Por lo tanto, la evaporación del tanque Clase A es un buen estimativo de la evapotranspiración actual (E_t) de la caña y ha sido usada con éxito en Hawai, Sudáfrica, Taiwán y Colombia. La evaporación del tanque Clase A se convierte en evapotranspiración actual al multiplicarla por un factor K que depende de la edad del cultivo y las condiciones del suelo. Para el valle del río Cauca, CENICAÑA ha encontrado que se pueden usar valores de $K=0.3$ durante el período de macollamiento (2 a 4 meses) y $K=0.7$ para el período de rápido crecimiento (4 a 10 meses); durante la fase de rápido crecimiento el valor de K se puede reducir a 0.5 para incluir el aporte de agua capilar en zonas con nivel freático entre 100 y 120 cm de profundidad. Durante el período de maduración de la caña se recomienda suprimir los riegos.

Balance hídrico

El balance hídrico es similar a una contabilidad del agua en el suelo, donde se comparan las ganancias y las pérdidas de humedad. El suelo aumenta su contenido de humedad cuando ocurre un evento de precipitación (P) o cuando se le aplica agua artificialmente por medio del riego (R). En campo también ocurren ganancias de humedad por contribución del nivel freático (NF), escorrentía (Es) y por flujo subsuperficial desde áreas cercanas. Las pérdidas de humedad del suelo se deben al agua que transpira la caña (Tr), la cual se pierde por evaporación desde la superficie del suelo (Ev), las pérdidas por percolación profunda (Pp) y las pérdidas por escorrentía (Pe) (Figura 4).

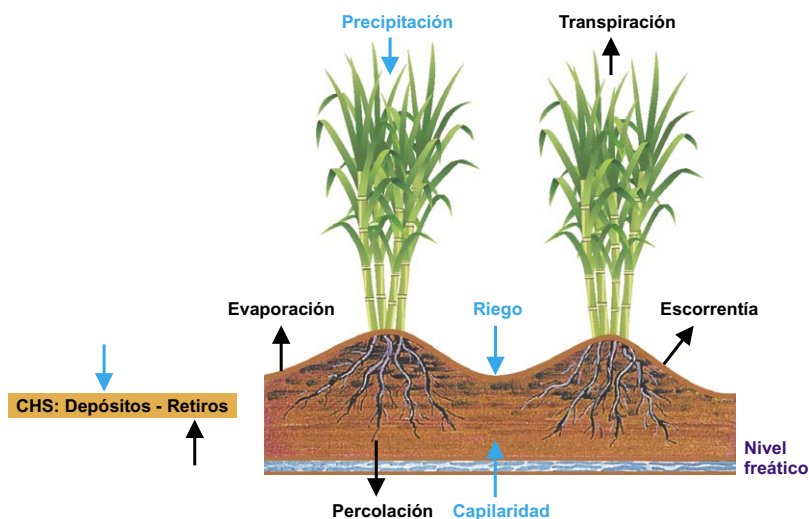


Figura 4. Representación esquemática de los componentes del balance hídrico.

El balance entre las ganancias y las pérdidas de humedad determina los cambios en la humedad del suelo (CHS) durante un período definido. Al expresar el balance de humedad en forma aritmética se tiene:

$$\text{CHS} = \text{GANANCIAS} - \text{PÉRDIDAS}$$

$$\text{CHS} = (P + R + NF) - (Ev + Tr + Pp + Pe) \quad (1)$$

En la ecuación (1), al combinar el agua perdida por evaporación (Ev) y la transpirada por las plantas se obtiene la evapotranspiración actual (Et) que permite transformar la ecuación así:

$$\text{CHS} = (P + R + NF) - (Et + Pp + Pe) \quad (2)$$

En zonas donde el nivel freático está profundo, el aporte de agua capilar es mínimo ($NF=0$). Presumiendo que no existen pérdidas por percolación profunda ni por escorrentía, la ecuación (2) se puede simplificar de la siguiente forma:

$$CHS = P + R - Et \quad (3)$$

El contenido de humedad del suelo y los otros parámetros incluidos en la ecuación del balance hídrico generalmente se expresan en términos de lámina de agua, definida como la profundidad de agua que se alcanzaría al colocar un volumen dado de agua en una superficie que es impermeable. Así, una lámina de 1 mm de profundidad se obtiene al verter 1 litro de agua en una superficie de 1 m², lo cual equivale a decir que tenemos un volumen de 10 m³ de agua por hectárea (Figura 5).

El cambio ocurrido en el contenido de humedad del suelo en un período determinado se puede estimar a partir del contenido de humedad inicial (LAS_i) y del contenido de humedad final (LAS_f), expresados ambos como láminas de agua en milímetros, así:

$$CHS = LAS_f - LAS_i \quad (4)$$

Reemplazando en la ecuación (3), se obtiene:

$$LAS_f = LAS_i + \sum_{t=1}^n (P + R - Et)_t \quad (5)$$

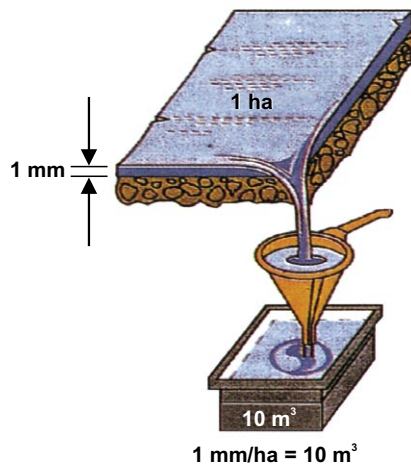


Figura 5. Representación esquemática del concepto de lámina de agua (adaptado de: Irrigation de la Canne a Sucre, CIRAD/CA-SAPHIR-SUAD)

Durante la aplicación de la metodología de balance hídrico se debe recordar que la estimación de la evapotranspiración actual a partir de las lecturas del tanque de evaporación es válida mientras exista en el suelo un suministro adecuado de humedad para la planta. Los cálculos del balance hídrico se deben iniciar después de un riego o de un aguacero, teniendo certeza de que el perfil del suelo está a capacidad de campo. Periódicamente se debe inspeccionar la humedad del suelo para realizar los ajustes que sean necesarios.

Un programa de balance hídrico a escala comercial permite conocer de manera aproximada el agua rápidamente disponible en el suelo para cada suerte, de manera que se puedan establecer prioridades para la aplicación del riego debido a que no siempre existen la capacidad humana ni el recurso hídrico suficientes para regar simultáneamente todos los campos que de acuerdo con el balance hídrico deben ser regados. CENICAÑA desarrolló el programa automatizado Balance Hídrico v.3.0® que opera en ambiente Windows® y está disponible para los ingenios y cultivadores donantes del Centro. En este programa se han establecido las siguientes prioridades de riego basadas en resultados experimentales:

Prioridad 1: Se regarán en primera instancia los campos de plantillas y socas que tengan entre 4 y 7 meses de edad.

Prioridad 2: Se regarán en segunda instancia los campos de plantillas y socas que tengan entre 7 y 10 meses de edad.

Prioridad 3: Se regarán en tercera instancia los campos de plantillas y socas que tengan entre 2 y 4 meses de edad.

En cuanto a la prioridad entre plantillas y socas, el orden es: plantilla, primera soca, segunda soca, etc.

El método de programación de los riegos por balance hídrico ofrece ventajas en cuanto al costo del programa y el tiempo dedicado por una persona para su ejecución. Desde luego, se necesita personal calificado que comprenda las relaciones suelo-agua-planta-atmósfera, capacitado para tomar decisiones acertadas de manejo del agua. La precisión del balance hídrico depende de la exactitud con que se determinen las constantes de humedad del suelo y los valores de evapotranspiración actual, además del buen juicio para realizar los ajustes requeridos por la metodología.

Balance hídrico diario

El balance hídrico se puede realizar para períodos variables, siendo preferible adelantarlos a diario. La ecuación (5) se puede generalizar de la siguiente manera para cálculos del balance diario:

$$LAS_{(t)} = LAS_{(t-1)} + (P + R - Et)_{(t-1)} \quad (6)$$

El subíndice (t) corresponde al día de interés mientras (t-1) hace referencia a los valores de las variables registrados el día anterior. Así, por ejemplo, para calcular la lámina de agua en el suelo (LAS_2) existente en la mañana del día 2 (t=2) se tienen en cuenta los registros de precipitación, riego y evapotranspiración actual ocurridos el día anterior o día 1 (t-1=1):

$$LAS_2 = LAS_1 + (P + R - Et)_1 \quad (7)$$

Los cálculos del balance de humedad en el suelo se repiten hasta cuando la LAS se aproxime a cero, momento en el cual se tomará la decisión de regar. En el Cuadro 4 se presentan, a manera de ilustración, los cálculos del balance hídrico diario.

Balance hídrico semanal

Este tipo de balance se adapta bien a zonas apartadas en donde los cálculos se deben realizar manualmente. Por lo general, las decisiones de programación de riegos de la semana siguiente se toman los días viernes; para realizar el balance se usan los valores acumulados de la precipitación, el riego y la evaporación del tanque para los siete días anteriores. La ecuación que facilita los cálculos tiene la siguiente forma:

$$LAS_{(t+7)} = LAS_{(t)} + \sum_{t=1}^{t=7} (P + R - Et)_t \quad (8)$$

Programación con pozos de observación

La ecuación general del balance hídrico incluye los aportes de agua capilar a partir de un nivel freático superficial ubicado entre 100 y 120 cm de profundidad. Al eliminar las pérdidas por percolación profunda (Pp) y las pérdidas por escorrentía (Pe) en la ecuación (2), se obtiene una expresión para estimar el aporte de agua capilar a partir del nivel freático:

$$NF = CHS - (P + R - Et)_t \quad (9)$$

Cuadro 4. Ejemplo de hoja de registros para el cálculo del balance hídrico diario.

Balance hídrico diario

Ingenio:	Área suerte:	Edad:
Hacienda:	Suelo:	K:
Suerte:	Variedad:	LARA:

Mes: mayoAño:										Mes: junio Año:									
Día	LAS	EV	Et	P	R	Exceso	Déficit	Día	LAS	EV	Et	P	R	Exceso	Déficit				
01	61.0	4.6	3.2	0				01	50.5	2.9	2.0	0							
02	57.8	3.3	2.3	0				02	48.5	4.3	3.0	0							
03	55.5	5.3	3.7	0				03	45.5	2.4	1.7	0							
04	51.8	3.4	2.4	0				04	43.8	3.4	2.4	0							
05	49.4	4.2	2.9	0				05	41.4	2.1	1.5	1							
06	46.5	4.6	3.2	7				06	40.9	4.6	3.2	0							
07	50.3	3.7	2.6	6				07	37.7	3.3	2.3	2							
08	53.7	5.1	3.6	0				08	37.4	2.1	1.5	0							
09	50.4	5.9	4.1	0				09	35.9	3.8	2.7	0							
10	46.0	5.1	3.6	0				10	33.2	5.6	3.9	0							
11	42.4	4.3	3.0	3				11	29.3	3.7	2.6	0							
12	42.4	3.2	2.2	0				12	26.7	4.4	3.1	2							
13	40.2	4.8	3.4	0				13	25.6	5.5	3.9	9							
14	36.8	5.1	3.6	0				14	30.7	4.4	3.1	0							
15	33.2	3.1	2.2	0				15	27.6	4.1	2.9	0							
16	31.0	2.2	1.5	2				16	24.7	3.0	2.1	2							
17	31.5	4.4	3.1	44		11.4		17	24.6	4.3	3.0	0							
18	61.0	3.7	2.6	6		3.4		18	21.6	5.7	4.0	0							
19	61.0	4.0	2.8	2				19	17.6	5.7	4.0	0							
20	60.2	3.7	2.6	0				20	13.6	5.3	3.7	11							
21	57.6	3.9	2.7	11		4.9		21	20.9	4.5	3.2	0							
22	61.0	5.6	3.9	10		6.1		22	17.7	5.3	3.7	0							
23	61.0	3.9	2.7	41		38.3		23	14.0	5.2	3.6	0							
24	61.0	4.0	2.8	0				24	10.4	4.6	3.2	0							
25	58.2	4.0	2.8	0				25	7.2	5.7	4.0	0							
26	55.4	3.7	2.6	2				26	3.2	4.6	3.2	0							
27	54.8	3.8	2.7	5				27	6.0	4.5	3.2	0	61						
28	57.1	2.7	1.9	5				28	61.0	3.8	2.7	0							
29	60.2	4.2	2.9	0				29	58.3	3.4	2.4	0							
30	57.3	4.9	3.4	0				30	55.9	3.9	2.7	0							
31	53.9	4.9	3.4	0															

LAS: lámina de agua en el suelo; R: evaporación; Et: evapotranspiración; P: riego. Todos los valores en milímetros.

La posición del nivel freático depende de los parámetros locales que determinan el balance hídrico; por tanto, se sugiere construir pozos de observación que permitan conocer la posición del nivel freático durante el desarrollo del cultivo y, de esta manera, poder predecir el momento oportuno del riego a partir de dicha posición.

El nivel freático en el valle del río Cauca señala una dependencia directa de la precipitación. La Figura 6 muestra un ejemplo en el cual se aplicaron 4 riegos durante el período final de la etapa de rápido crecimiento (7 a 10 meses de edad del cultivo), con una frecuencia de 25 a 30 días. Durante este período el nivel freático declinó constantemente hasta llegar a una profundidad mayor a 1.20 m, considerada una posición crítica porque a partir de ésta el aporte de agua freática es mínimo. En consecuencia, cuando el nivel freático se mantiene a profundidades mayores que 1.20 m durante 25 días o más, y en ese período no ocurren lluvias apreciables, es necesario regar.

Los pozos de observación se pueden construir usando secciones de manguera plástica (rígida) de 1.5 a 2.0 m de longitud y de 2.5 a 5.0 cm de diámetro, con agujeros de 2 a 4 mm perforados en el extremo inferior (0.5 a 1.0 m) que va colocado en el fondo del agujero. Inicialmente, la red de pozos de

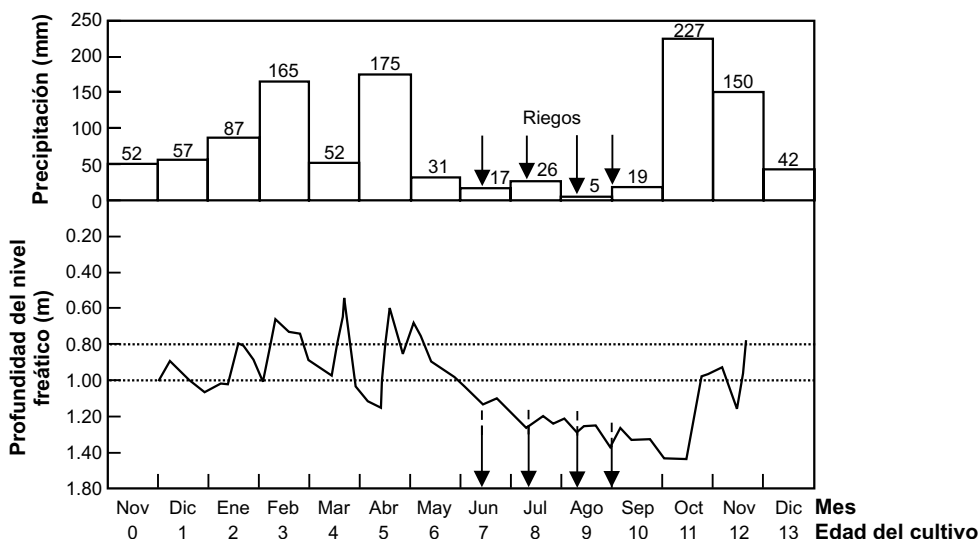


Figura 6. Comportamiento del nivel freático durante el desarrollo de la caña de azúcar (noviembre 06 de 1989 a diciembre de 1990).

observación se puede construir colocando tres pozos en un arreglo triangular. Posteriormente, cuando se realizan las primeras lecturas, se puede decidir sobre la necesidad de instalar más pozos teniendo la precaución de seguir siempre una distribución triangular.

Programación con el tanque Cenirrómetro

El balance de humedad en el suelo es un proceso hídrico que opera naturalmente en el campo de cultivo. Al conocer los parámetros que determinan los cambios en la humedad del suelo se pueden hacer predicciones de los cambios en la lámina de agua disponible y anticipar la fecha de riego.

En el tanque Cenirrómetro desarrollado por CENICAÑA (Torres y Cruz, 1995) se considera el suelo como un reservorio de agua para las plantas y se aprovecha el concepto del balance hídrico natural como una alternativa de carácter práctico que permite decidir, por inspección visual del nivel del agua en un recipiente plástico, el momento oportuno del riego.

Retomemos la ecuación simplificada del balance hídrico indicada antes como ecuación (5). Después de aplicar un riego, se repone la lámina de agua rápidamente aprovechable (LARA) y el perfil del suelo estará a capacidad de campo. Desde luego, la lámina de agua en el suelo LAS_i después del riego es igual a la LARA. Este mismo fenómeno puede ocurrir después de una lluvia fuerte. Así,

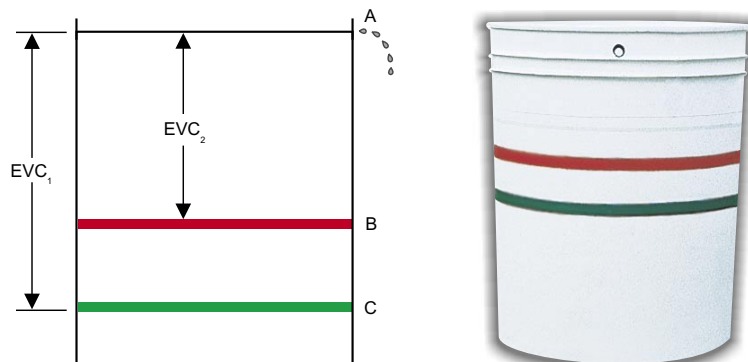
$$LAS_i = LARA \quad (10)$$

$$LAS_f = LARA + (P + R - Et)_t \quad (11)$$

Después de transcurrido un tiempo la LARA disponible en el suelo se va agotando; por consiguiente, el valor de LAS_f determinado por la ecuación (11) del balance, se acerca a cero, siendo necesario regar:

$$0 = LARA + (P + R - Et)_t \quad (12)$$

La evaporación del tanque Clase A está estrechamente relacionada con la evaporación registrada en el Cenirrómetro, un tanque cilíndrico de color claro (material plástico) con 26 a 30 cm de diámetro y 35 a 40 cm de altura (Figura 7).



EVC: distancia (cm) entre el orificio vertedero de excesos (A) y las marcas de control que indican la necesidad de riego según la edad del cultivo (B: más de 4 meses de edad; C: entre 2 y 4 meses).

Figura 7. Representación esquemática del tanque Cenirómetro con las líneas de marcación.

Al despejar la LARA de la ecuación (12) se obtiene la ecuación (13), donde se puede visualizar que solamente se aplicarán riegos cuando se haya consumido toda el agua rápidamente aprovechable (LARA); o sea que $R=0$. Esto indica que cuando la suma de los valores diarios de evapotranspiración menos la precipitación se acerca al valor numérico de la LARA el suelo está muy seco y es necesario aplicar riego.

$$LARA = (Et - P)_t \quad (13)$$

La evaporación registrada en el Cenirómetro es 9% superior a la medida en el tanque Clase A; la relación entre la evaporación de los tanques es lineal con un coeficiente de determinación igual a 0.99 (Figura 8). En el tanque Cenirómetro se involucra la edad del cultivo con el valor de K (para convertir la evaporación en evapotranspiración actual) y la capacidad de almacenamiento de humedad del suelo o lámina de agua rápidamente aprovechable. El hecho de que la precipitación sea o no efectiva está determinado por la capacidad de almacenamiento existente en el suelo cuando ocurre la precipitación.

El tanque Cenirómetro tiene definida la máxima capacidad de almacenamiento de agua rápidamente aprovechable (LARA) por medio de un orificio que drena el exceso de agua. El riego será programado visualmente cuando el nivel del agua en el tanque se acerque a una de las dos marcas de referencia, correspondiendo la marca inferior al control para los primeros 4 meses de edad del cultivo y la marca superior al control durante el período de 4 a 10 meses.

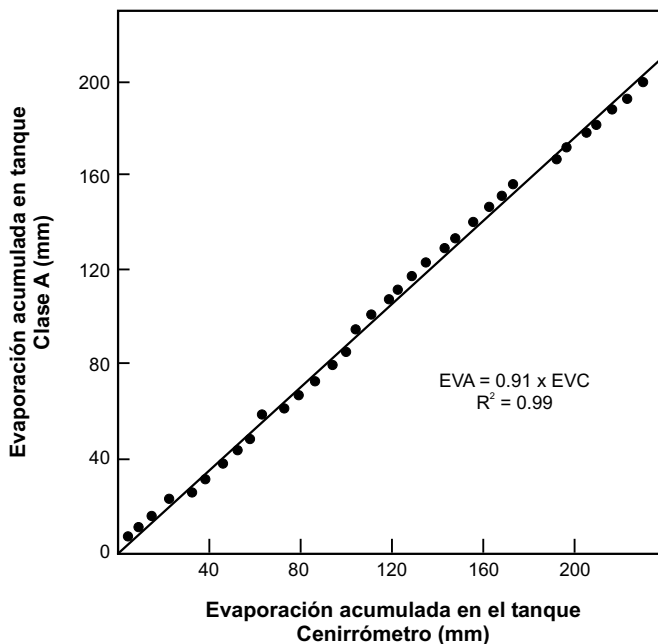


Figura 8. Relación entre la evaporación acumulada del tanque Clase A y el tanque Cenirrómetro.

La distancia entre el orificio vertedero de excesos y las marcas de control se calcula a partir de las siguientes relaciones:

$$EVA = C \times EVC \quad (14)$$

$$Et = EVA \times K \quad (15)$$

$$Et = (C \times EVC) \times K \quad (16)$$

En las expresiones anteriores el valor de C es igual a 0.91 y convierte la evaporación del tanque Cenirrómetro (EVC) en evaporación equivalente del tanque Clase A (EVA). El momento oportuno del riego se determina cuando la evapotranspiración acumulada menos la precipitación es equivalente a la LARA disponible en el suelo: $LARA = \sum (Et - P)$.

Ahora se tiene:

$$LARA = EVC \times C \times K \quad (17)$$

$$EVC = \frac{LARA}{C \times K} = \frac{LARA}{0.91 K} \quad (18)$$

Al reemplazar la ecuación (18) en la ecuación (13) se obtiene la ecuación general del balance hídrico en el tanque Cenirrómetro, así:

$$EVC = \frac{LARA}{0.91 K} = \frac{\sum_{t=1}^n (Et - P)_t}{0.91 K} \quad (19)$$

Teniendo en cuenta el cambio de K y de la profundidad radical al pasar del período de macollamiento al de rápido crecimiento, se pueden obtener las expresiones que permiten definir las marcas del tanque Cenirrómetro:

Período de 2 a 4 meses (macollamiento):

$$EVC_1 = \frac{LARA_1}{0.91 \times 0.3} = 3.7 \times LARA_1 \quad (20)$$

Período de 4 a 10 meses (rápido crecimiento):

$$EVC_2 = \frac{LARA_2}{0.91 \times 0.7} = 1.6 \times LARA_2 \quad (21)$$

A partir de las ecuaciones (20) y (21) se pueden definir las marcas del Cenirrómetro, teniendo en cuenta la edad de la caña y la capacidad de retención de humedad de los suelos. En el Cuadro 1 (pág. 7) se presentan algunos valores para las marcas EVC_1 y EVC_2 para varios suelos representativos del valle del río Cauca. Estos valores pueden servir como referencia para iniciar el balance, mientras se obtienen los valores de LARA a partir de las determinaciones directas de las constantes de humedad para cada tipo de suelo.

Los beneficios del tanque Cenirrómetro como un programador de riegos han sido probados ampliamente a escala experimental y comercial, lo cual nos permite recomendar su adopción. A pesar de la sencillez del Cenirrómetro, hemos observado incertidumbre para su adopción debido a la carencia de las constantes de humedad requeridas para los diferentes suelos. Además, existen diferencias físicas y locales en cada campo de cultivo que hacen cambiar algunos valores con respecto a los publicados por CENICAÑA.

La naturaleza superficial de los suelos del valle del río Cauca conlleva pequeñas diferencias en los valores de LARA de los diferentes suelos, lo cual nos ha permitido sugerir unos valores de referencia para las marcas del Cenirrómetro en función de la textura del suelo (Figura 9). La programación por balance hídrico involucra un proceso de refinamiento de los parámetros usados para el cálculo. Se sugiere obtener las constantes de humedad por determinaciones directas en el laboratorio o en el campo (ver Apéndice).

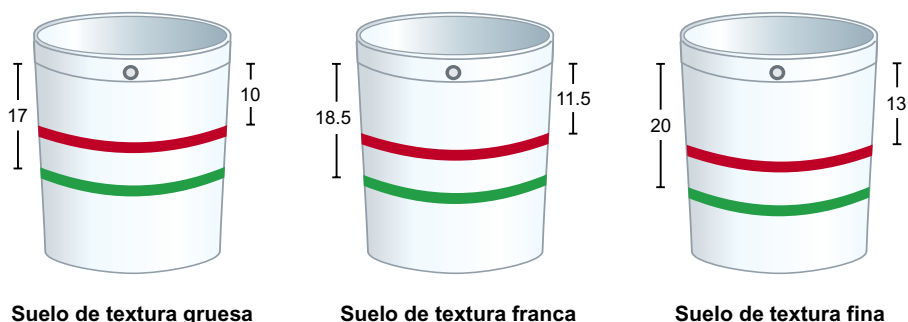


Figura 9. Valores sugeridos (en centímetros) para la marcación del tanque Cenírrómetro de acuerdo con la textura del suelo.

Ejemplo de cálculo del balance hídrico

Balance hídrico diario

En el Cuadro 4 (pág. 7) se presenta una hoja de cálculo del balance hídrico diario en la hacienda Gertrudis 18A del Ingenio Manuelita. Los meses corresponden a mayo y junio, es decir, la transición entre un período húmedo y otro seco, y la edad de la caña a 6 y 7 meses. A esta edad la caña se encuentra en el período de rápido crecimiento y se debe usar una profundidad radical de 80 cm para calcular la lámina de agua aprovechable; el factor K del cultivo para convertir la evaporación del tanque Clase A en evapotranspiración actual es igual a 0.7.

Al retomar la ecuación (6) para el balance hídrico diario se tiene:

$$LAS_t = LAS_{(t-1)} + (P + R - Et)_{(t-1)}$$

$$LAS_t = LAS_{(t-1)} - (Et - P - R)_{(t-1)}$$

Mayo 1 (viernes), $t=1$

Para iniciar el balance el día mayo 1 se tienen los siguientes registros (Cuadro 4):

$$\begin{aligned}
 LAS_1 &= 61.0 \text{ mm}, & Ev_1 &= 4.6 \text{ mm}, & Et_1 &= 0.7 \times 4.6 \text{ mm} = 3.2 \text{ mm} \\
 P_1 &= 0 \text{ mm}, & R_1 &= 0 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Mayo 2 (sábado), $t=2$

$$LAS_2 = LAS_1 - Et_1 + P_1 + R_1$$

$$LAS_2 = 61.0 - 3.2 + 0 + 0 = 57.8 \text{ mm}$$

Mayo 3 (domingo), $t=3$

$$LAS_3 = LAS_2 - Et_2 + P_2 + R_2$$

$$LAS_3 = 57.8 - 3.3 \times 0.7 + 0 + 0 = 55.5 \text{ mm}$$

De esta manera se prosiguió con los cálculos del balance, hasta llegar al día 17 de mayo cuando se presentó una precipitación de 44 mm.

Mayo 17 (domingo), $t=17$

$$LAS_{17} = LAS_{16} - Et_{16} + P_{16} + R_{16}$$

$$LAS_{17} = 31.0 - 1.5 + 2 + 0 = 31.5 \text{ mm}$$

Mayo 18 (lunes), $t=18$

$$LAS_{18} = LAS_{17} - Et_{17} + P_{17} + R_{17}$$

$$LAS_{18} = 31.5 - 3.1 + 44 + 0 = 72.4 \text{ mm}$$

Para este día 18 de mayo es necesario recordar que la capacidad máxima de almacenamiento de humedad rápidamente aprovechable en este suelo es equivalente a una LARA = 61 mm. Por lo tanto, cuando el valor obtenido para la LAS supera la capacidad de almacenamiento, la diferencia se pierde como exceso. El exceso en este día será igual a $Ex = 72.4 - 61 = 11.4 \text{ mm}$ y el agua en el suelo para el día 19 de mayo será $LAS_{19} = 61 \text{ mm}$.

Mayo 19 (martes), $t=19$

$$LAS_{19} = LAS_{18} - Et_{18} + P_{18} + R_{18}$$

$$LAS_{19} = 61.0 - 2.6 + 6 + 0 = 64.4 \text{ mm}$$

$$LAS_{19} = 61.0 \text{ mm}, \text{ Exceso} = 3.4 \text{ mm}$$

Los cálculos diarios del balance se continúan hasta cuando la LAS se aproxima a cero. En ese momento se debe tomar la decisión de regar para

reponer una lámina de 61 mm. En el ejemplo del Cuadro 4 la $LAS=0$ ocurre el 27 de junio.

El balance hídrico se debe usar como una herramienta práctica que permite predecir la fecha de riego con suficiente anticipación. De esta manera, si el viernes 19 de junio realizamos la predicción de la fecha de riego, podemos tomar la evaporación media que ocurrió en la semana anterior (viernes 12 a viernes 19) que es $31.4 \text{ mm}/7 \text{ días}=4.5 \text{ mm/día}$. La evapotranspiración promedio es $Et=4.5 \times 0.7=3.2 \text{ mm/día}$. La $LAS_{19}=17.6 \text{ mm}$, sería consumida en $t=17.6 \text{ mm} \div 3.2 \text{ mm/día}=6 \text{ días}$; es decir que el riego se debería aplicar el miércoles 24 de junio, siempre y cuando no ocurran lluvias que justifiquen posponer la fecha de riego. Para este ejemplo, el riego se aplazó tres días debido a la precipitación de 11 mm caída el sábado 20 de junio.

En algún momento, durante el levantamiento del cultivo, los riegos se pueden retrasar por una semana o más debido a dificultades operativas. En estos casos el balance entra inmediatamente en déficit, mostrando valores negativos de LAS y valores crecientes de déficit. Una vez se aplique el riego por surcos la LAS será igual a la LARA que para este ejemplo es de 61 mm. Los valores acumulados de déficit se dejan en la hoja del balance para documentar el manejo de la plantación.

Balance hídrico semanal

Esta forma de realizar el balance hídrico usando valores acumulados de la evaporación y la precipitación para períodos semanales se adapta bastante bien a lugares en donde no se dispone de una computadora para llevar el balance hídrico sistematizado. El balance hídrico semanal simplifica los cálculos aritméticos y existe el riesgo de perder algo de precisión en la definición de la fecha de riego, especialmente cuando ocurren eventos de lluvia. Esta forma de adelantar los cálculos del balance hídrico fue comparada experimentalmente con el balance hídrico diario y se obtuvo mucha similitud en las fechas de riego, lo cual resultó en la aplicación del mismo número de riegos.

Período: mayo 1 a mayo 8

La lámina de agua rápidamente aprovechable disponible en el suelo en la mañana de mayo 1 es de $LAS_1=61 \text{ mm}$ (Cuadro 4). La evaporación acumulada entre mayo 1 y mayo 8 es de 29.1 mm, que se puede convertir en evapotranspiración acumulada usando un $K=0.7$ para este período de rápido crecimiento

(29.1 x 0.7=20.4 mm); la precipitación acumulada es de 13 mm, riego=0 mm. Al retomar la ecuación (8) para el cálculo del balance semanal, se tiene:

$$LAS_{(t+7)} = LAS_t - \sum_{t=n}^{n+6} (Et - P - R)$$

$$LAS_2 = LAS_1 - \sum_{t=1}^7 (Et - P - R)$$

$$LAS_8 = 61 - (20.4 - 13 - 0) = 61 - 20.4 + 13 = 53.6 \text{ mm}$$

Período: mayo 8 a mayo 15

$$LAS_{15} = LAS_8 - \sum_{t=8}^{14} (Et - P - R)_t$$

La evaporación acumulada en este período es de 33.5 mm,

$$\sum Et = 33.5 \times 0.7 = 23.5 \text{ mm}, \quad \sum P = 3 \text{ mm}, \quad \sum R = 0 \text{ mm},$$

$$LAS_8 = 53.6 \text{ mm}.$$

$$LAS_{15} = 53.6 - (23.5 - 3 - 0) = 33.1 \text{ mm}$$

Período: mayo 15 a mayo 22

$$LAS_{22} = LAS_{15} - (Et - P - R)_t$$

$$LAS_{22} = 33.1 - (17.5 - 65 - 0) = 80.6 \text{ mm}$$

La LAS no puede superar el valor de 61 mm; luego, este día ocurrirá un exceso de humedad de 19.6 mm, $LAS_{22}=61 \text{ mm}$.

Período: mayo 22 a mayo 29

$$LAS_{29} = 61 - (19.4 - 63 - 0)$$

$$LAS_{29} = 61 \text{ mm}, \quad \text{Exceso} = 43.6 \text{ mm}$$

Al comparar los valores de la LAS obtenidos por balance hídrico semanal con los del balance diario para los días mayo 8, mayo 15, mayo 22 y mayo 29 (Cuadro 4), se puede observar que ellos coinciden bastante bien, razón por la cual se recomienda el balance hídrico semanal como alternativa para la programación de los riegos:

$$LAS_8 = 61 - (20.4 - 13 - 0) = 61 - 20.4 + 13 = 53.6 \text{ mm}$$

Requerimientos de riego de acuerdo con la época de siembra o cosecha

Los requerimientos de riego de la caña de azúcar dependen de las fechas de siembra o de cosecha, prácticas que en el valle del río Cauca se realizan como una operación continua durante todo el año. Una vez preparados los campos se procede a sembrar y enseguida se aplica un riego de germinación por aspersión o por surcos. Posteriormente se puede requerir la aplicación de dos riegos adicionales para el establecimiento del cultivo, con frecuencia de 10 a 15 días. Después del establecimiento de la plantilla el consumo de agua por la planta es muy bajo hasta los 4 meses, cuando se inicia el período de rápido crecimiento. En el caso de las cañas socas se ha encontrado que el consumo de agua en los primeros cuatro meses es mínimo, por lo cual se recomienda reducir la aplicación de los riegos en el período de rebrote y macollamiento de las socas.

CENICAÑA ha encontrado en sus experimentos que el período de 4 a 7 meses es crítico desde el punto de vista de disponibilidad de humedad para la caña, razón por la cual las cañas plantillas y las socas deben regarse cuidadosamente en este período para no afectar negativamente la producción de caña y azúcar.

El período de rápido crecimiento en variedades tempranas se extiende de los 4 a los 10 meses. En lo posible, la caña se debe regar adecuadamente en este período, dando prioridad al período inicial (4 a 7 meses). Al tener en cuenta los requerimientos de agua del cultivo es preciso reconocer que las necesidades de riego dependen de la época de siembra o cosecha de la caña. De esta manera, la necesidad de aplicar riegos será menor cuando la etapa de rápido crecimiento (4 a 10 meses) coincida con uno de los períodos de lluvia.

En la Figura 10 se presentan los períodos y la cantidad de déficit de agua esperada de acuerdo con la época de siembra o cosecha de la caña. En este caso, el balance hídrico mensual se adelantó con valores mensuales de precipitación al 70% de probabilidad y con la evaporación media mensual (50% de probabilidad). La evapotranspiración actual se estimó usando valores de $K=0.3$ para el período de 0 a 4 meses y $K=0.7$ entre 4 y 10 meses de edad. Los menores requerimientos de riego se encontraron para las cañas comerciales sembradas o cosechadas entre junio y agosto debido a que el período de

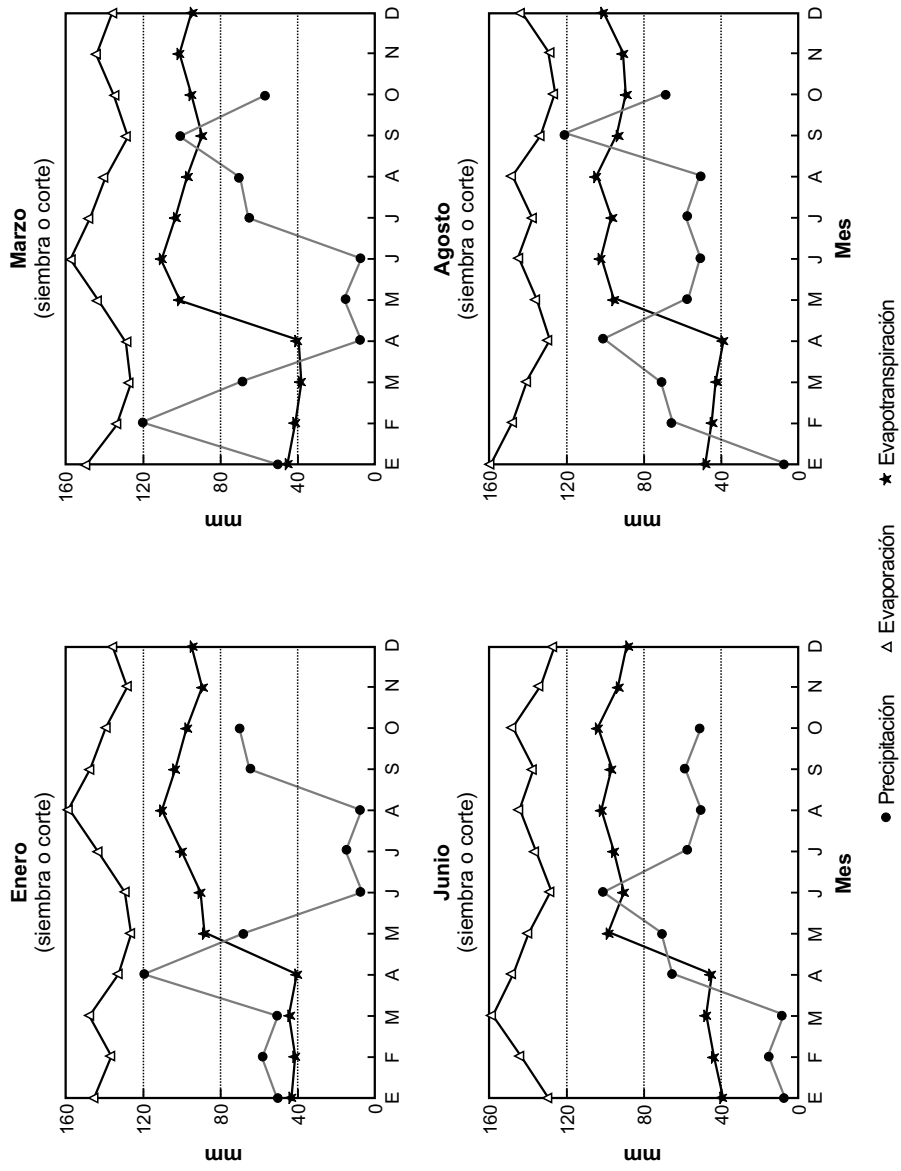


Figura 10. Balance hídrico para cañas sembradas o cosechadas en diferentes épocas del año.

rápido crecimiento coincidió con meses relativamente lluviosos. En zonas con problemas de disponibilidad de agua para el riego, la siembra y la cosecha de la caña se deben ajustar en lo posible a la distribución de las lluvias para disminuir la necesidad de riego.

Zonificación climática por balance hídrico

El balance hídrico de una región se define como el balance entre la precipitación y la evaporación; por tanto, integra los diferentes parámetros del clima. Cuando se aplica a un cultivo específico como la caña de azúcar, la evaporación se reemplaza por la evapotranspiración actual de dicho cultivo. El balance hídrico regional identifica las épocas secas (déficit de humedad) y húmedas (excesos) y las zonas donde éstas ocurren, y puede ser una ayuda para asignar los recursos hídricos requeridos para compensar los déficits de precipitación. Por otra parte, se puede visualizar la necesidad de infraestructura para la evacuación de excesos de humedad.

Los mapas con las curvas de isobalance hídrico que unen puntos de igual valor de déficit o exceso de agua fueron desarrollados a partir de un trabajo cooperativo entre CENICAÑA y la CVC, en el cual se recopilaban los registros provenientes de 140 estaciones de precipitación distribuidas a lo largo del valle del río Cauca, a los que se les realizó un análisis de consistencia; se efectuó un estudio de frecuencias de los registros de precipitación y se optó por seleccionar el valor de la precipitación con probabilidad de ocurrencia del 75%. Los valores mensuales de precipitación seleccionados con esta probabilidad corresponden al valor mínimo esperado, teniendo la certeza de que en el 75% de los casos se obtendrá una precipitación mensual superior al valor seleccionado. De otra manera, una probabilidad del 75% se puede interpretar como el valor mínimo de precipitación que se obtendrá en 7.5 años dentro de un período de 10 años: solamente podrán ocurrir 2.5 años con precipitación menor o igual dentro de un ciclo de 10 años.

Los registros de evaporación usados provinieron de 37 estaciones de primer orden. Para el análisis de estos registros se comparó estadísticamente la evaporación media mensual (probabilidad de 50%) con los valores de evaporación con probabilidad del 75%. Los análisis estadísticos mostraron

diferencias altamente significativas entre los dos valores de probabilidad estudiados. Sin embargo, las diferencias numéricas eran tan pequeñas que se optó por realizar los cálculos usando la evaporación media mensual. Los valores de evaporación se convirtieron en evapotranspiración, multiplicando la evaporación por el factor $K=0.7$ que se usa para estimar el consumo de agua durante el período de rápido crecimiento.

Las curvas de isobalance hídrico a escala mensual se trazaron con intervalos de 30 mm y a escala anual con intervalos de 200 mm. Las franjas delimitadas entre dos curvas se colorearon para facilitar la identificación visual de las áreas que presentan diferentes niveles de déficit o excesos de precipitación.

Entre 1993 y 2001 la industria azucarera estableció una red de 29 estaciones automáticas que registran los diferentes parámetros del tiempo atmosférico y envían la información con intervalos muy cortos, vía radio, a la estación central en CENICAÑA donde es analizada y procesada. A partir de la información de la red y de registros manuales recolectados entre 1970 y 1998 por el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), el Centro Nacional de Investigaciones de Café “Pedro Uribe Mejía” (CENICAFÉ), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), la CVC y los ingenios azucareros se conformó un conjunto de 49 pluviómetros y 34 tanques de evaporación Clase A, con los cuales se recalcularon los balances hídricos utilizando el sistema de información geográfica (SIG) y la geoestadística. Los nuevos mapas de isobalance hídrico tienen un mayor grado de precisión que los presentados en la primera edición de esta publicación.

El mapa de isobalances para el mes de abril (Figura 11, izquierda), que se caracteriza por ser el más lluvioso del año, muestra que normalmente se presentan excesos de agua en todo el valle geográfico del río Cauca. Sin embargo, el nivel de excesos no es igual en toda el área: en la zona comprendida entre el norte de Candelaria, Palmira, CIAT, aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón, Rozo y San Marcos, el exceso de humedad oscila entre 0 y 30 mm, mientras que en las zonas entre Candelaria, Pradera, Cerrito, Guacarí, Buga y Tuluá, y entre Zarzal y Obando, los excesos varían entre 30 y 60 mm; entre los municipios de Tuluá y Zarzal aparece una zona de excesos de humedad en el rango de 60 a 90 mm, el mismo que se encuentra desde Obando hasta La Virginia, entre los municipios de Cali, Candelaria, Florida y Miranda, y entre el oriente de Palmira, Amaime y Cerrito; al sur del valle, entre Jamundí, Puerto Tejada,

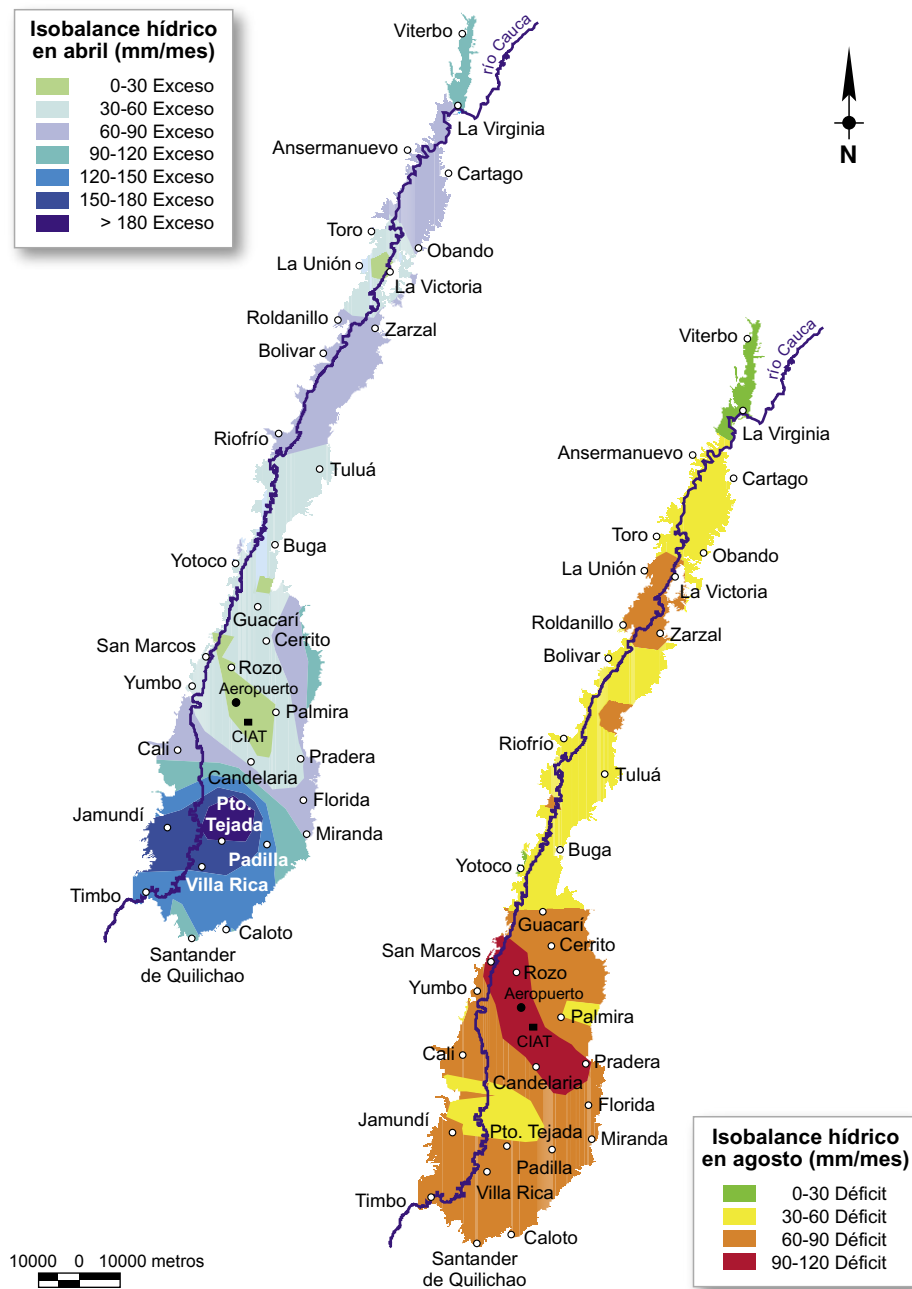


Figura 11. Mapas de isobalance hídrico en los meses de abril y agosto para condiciones de clima promedio en el valle del río Cauca.

Villa Rica y Santander de Quilichao, los excesos de humedad superan el valor de 90 mm por mes. En conclusión, las curvas de isobalance para el mes de abril muestran que prácticamente todo el valle geográfico del río Cauca puede requerir infraestructura de drenaje para el cultivo de la caña de azúcar.

El mapa de isobalances para el mes de agosto (Figura 11, derecha) muestra un déficit de humedad generalizado debido a que corresponde a uno de los meses más secos del año. La zona con menor valor de déficit de humedad (0 a 30 mm/mes) se presenta al norte del valle, entre los municipios de La Virginia y Viterbo. En orden de déficit creciente de humedad se observan tres zonas con déficit entre 30 y 60 mm/mes: la primera coincide con el área localizada entre La Victoria y Cartago, la segunda abarca los municipios de Guacarí, Buga, Tuluá y Zarzal, y la tercera cubre los municipios de Cali, Candelaria, Puerto Tejada y norte de Jamundí. Así mismo, se identifica una zona bastante amplia con déficit de precipitación entre 60 y 90 mm que se extiende desde Santander de Quilichao hasta Guacarí y desde Zarzal hasta La Victoria. Finalmente, se define bastante bien la zona más seca del valle, con déficit de precipitación entre 90 y 120 mm, que abarca las poblaciones de San Marcos, Rozo, Palmira, Candelaria y Pradera. Las curvas de isobalance para el mes de agosto indican que es necesario contar con sistemas de riego para suplir el déficit de agua en el cultivo de la caña.

El mapa de isobalance para el valle del río Cauca en un año promedio (normal) (Figura 12) presenta cinco áreas diferenciadas por intervalos de excesos o déficits de humedad de 200 mm. En el sur del valle (entre Jamundí, Timba, Puerto Tejada y Santander de Quilichao) y en el norte (entre La Virginia y Viterbo) se presentan excesos de humedad de 400 a 600 mm/año. Entre Puerto Tejada y Cali, Buga y Tuluá, Obando y La Virginia y en el piedemonte de la cordillera Central que va desde Miranda hasta Buga, se presenta un exceso de humedad de 200 a 400 mm al año.

También se observa una zona con excesos de 0 a 200 mm en el anillo formado por los municipios de Cali, Candelaria, Miranda, Florida, Pradera, Palmira y Cerrito, en la zona entre Tuluá y Zarzal y entre La Victoria y Cartago. Un déficit de 0 a 200 mm se presenta en el área localizada entre Yumbo, Candelaria, Palmira y Cerrito y entre Zarzal y La Victoria al norte del valle. Finalmente, la zona más seca del valle del río Cauca se encuentra localizada entre el CIAT, Rozo y San Marcos, con un déficit anual de 200 a 400 mm.

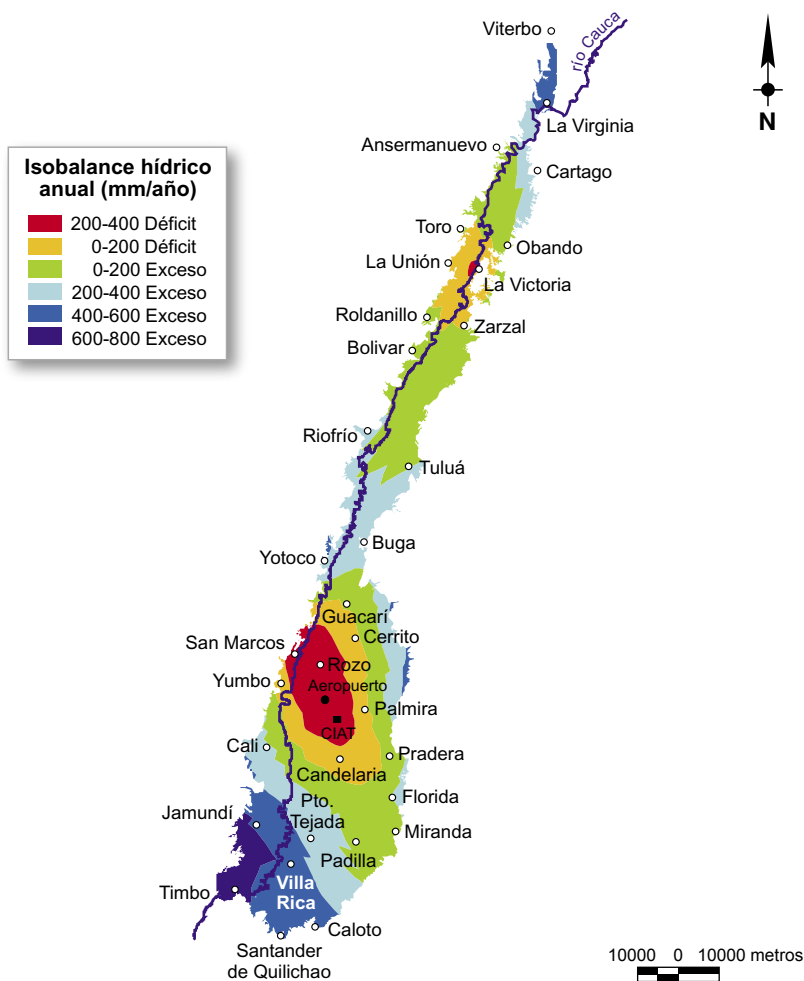


Figura 12. Mapas de isobalance hídrico anual para condiciones de clima promedio en el valle del río Cauca.

El mapa de isobalance anual indica que en las zonas sur y norte del valle geográfico del río Cauca se debe hacer énfasis en los sistemas de drenaje para la evacuación de excesos de aguas superficiales, mientras que en la zona central la prioridad es el riego.

El balance hídrico regional, plasmado como curvas de isobalance, sirve para reconocer las áreas en donde se requieren obras para incrementar la disponibilidad de agua de riego tales como bocatomas, pozos profundos, reservorios, conducciones, entre otras, y tecnologías para disminuir los consumos de agua tales como la programación de riegos por balance hídrico, el riego por surco alterno, los politubulares o tubería con compuertas en lugar de las acequias de riego, el riego por aspersión y el riego por goteo. Los mapas de isobalance hídrico son una herramienta importante para la planeación y el manejo de los recursos hídricos de la región.

Los niveles de déficit o exceso de agua en el suelo y su localización mediante los mapas de isobalance hídrico han tenido una aplicación importante junto con la permeabilidad de los suelos y su distribución geográfica en el valle del río Cauca para conformar los Grupos de Humedad. Dichos grupos identifican los campos donde se presentan condiciones normales y aquellos donde prevalecen condiciones difíciles debido a la alta precipitación y a la baja permeabilidad del suelo (Torres *et al*, 2000). Los Grupos de Humedad se han unido con los Grupos de Manejo de Suelos (Quintero y Castilla, 1992) para determinar las zonas agroecológicas para el cultivo de caña de azúcar en el valle del río Cauca. Las zonas agroecológicas integran elementos de suelo y clima y caracterizan condiciones relativamente homogéneas que inciden en el manejo agronómico del cultivo y en la producción. La zonificación agroecológica se ha convertido en una herramienta fundamental para la investigación sobre variedades y para la definición de las prácticas culturales con el enfoque de agricultura específica por sitio.

Apéndice

Propiedades físicas del suelo

Separados del suelo

Las partículas minerales del suelo han sido clasificadas por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de acuerdo con su tamaño y comúnmente se les conoce con el nombre de separados del suelo, así:

Separados del suelo	Diámetro de partículas (mm)
Arena muy gruesa	1.00 - 2.00
Arena gruesa	0.50 - 1.00
Arena media	0.25 - 0.50
Arena fina	0.10 - 0.25
Arena muy fina	0.05 - 0.10
Limos	0.002 - 0.05
Arcillas	< 0.002

Textura

No existe una definición universal para la textura del suelo. Inicialmente fue utilizada para describir el grado de dificultad que presentaba un suelo para ser laborado; de allí surgieron las apreciaciones de suelos liviano y pesado. Actualmente, el concepto de textura es usado como una medida de la proporción de las partículas de arena, limo y arcilla que conforman un suelo.

Textura al tacto

En el campo se puede estimar la textura del suelo frotando una masa pequeña de suelo húmedo entre los dedos. La forma como fluye el suelo permite estimar la plasticidad y consecuentemente obtener una idea de la cantidad de arcilla, limos y arenas que éste contiene.

Las arenas son ásperas y se presentan como partículas individuales; al apretarlas en la palma de la mano en condición húmeda forman una masa continua que se disgrega fácilmente al tocarla.

Los limos tienen la apariencia de talco o harina; en húmedo son moderadamente plásticos y pegajosos.

Las arcillas son muy finas y se perciben como una masa suave, muy plástica y pegajosa en húmedo; permiten la formación de rollos y tiras largas de suelo.

Los suelos de textura franca tienen una proporción muy balanceada de arenas, limos y arcillas. Estos suelos son blandos, sueltos, algo suaves y ligeramente plásticos en húmedo. Se pueden amasar en la mano sin que se disgreguen.

La apreciación de la textura al tacto es de gran importancia para todas las personas que manejan los suelos y, como tal, es necesario desarrollar una buena capacidad de apreciación de la textura directamente en el campo. Es de anotar que la apreciación textural al tacto está muy influenciada por los contenidos de materia orgánica y óxidos de hierro que determinan en gran parte la plasticidad y la consistencia del suelo.

Textura por análisis mecánico

El análisis mecánico permite conocer la proporción porcentual de partículas de arena, limo y arcilla presentes en una muestra de suelo. El nombre textural se puede obtener del triángulo de texturas desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Figura A-1). Las líneas de separación

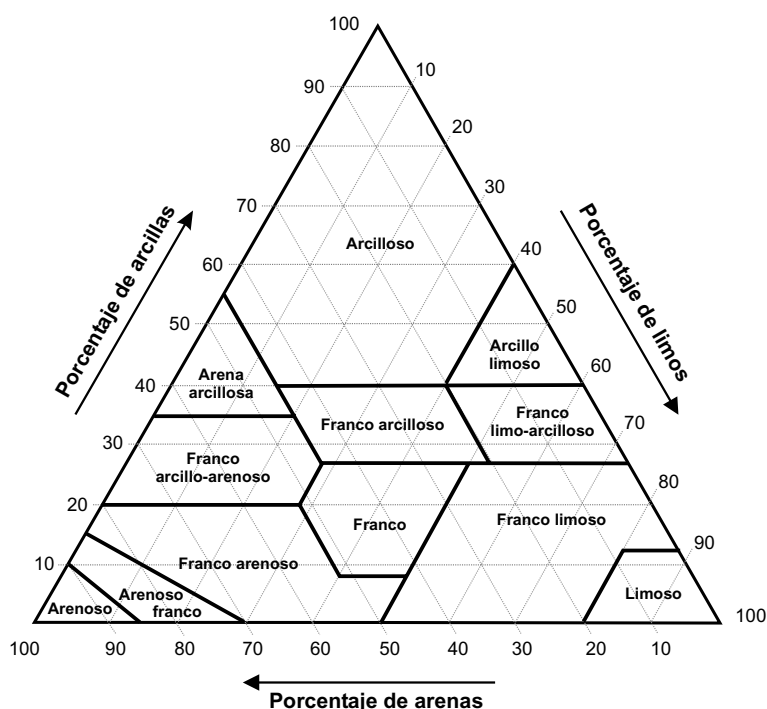


Figura A-1. Diagrama para la determinación del nombre textural a partir del análisis mecánico del suelo.

entre las diferentes clases texturales fueron seleccionadas de tal manera que coincidieran con la apreciación del grado de dificultad para el laboreo del suelo. Se recomienda evitar el uso de los términos pesado y liviano para hacer referencia a la textura del suelo.

Estructura

Morfológicamente la estructura del suelo ha sido definida en función de la manera como se agrupan las partículas primarias de arena, limo y arcillas para formar agregados individuales de forma y tamaño similares. Existen otros factores relacionados con la estructura del suelo que están más ligados con la relación planta-suelo que con la misma forma y tamaño de los agregados, tales como la distribución del espacio poroso, la estabilidad al agua y la dureza de los agregados.

El arreglo estructural de los agregados tiene un gran efecto sobre el movimiento de aire y agua en el suelo, la resistencia mecánica y la temperatura del suelo. La estructura tiene un efecto directo sobre algunas propiedades del suelo como la permeabilidad, la velocidad de infiltración, la densidad aparente, la porosidad aérea y el módulo de ruptura. En la Figura A-2 se presenta una descripción esquemática de los tipos de estructura normalmente encontrados en los suelos minerales.

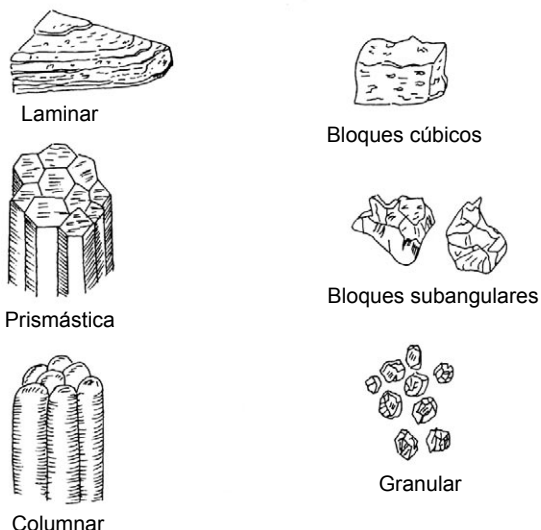


Figura A-2. Arreglos estructurales más comunes encontrados en los suelos minerales.

Densidad aparente (Da)

Es definida como la relación entre la masa de un suelo seco y el volumen total, que incluye el volumen de los sólidos y los poros del suelo.

$$\text{Densidad aparente (Da)} = \frac{\text{Masa sólidos (gramos)}}{\text{Volumen total (cm}^3\text{)}} \quad (\text{A-1})$$

La densidad de un suelo suelto y poroso es baja (1.1 - 1.2 g/cm³); mientras que en suelos compactos este valor puede ser superior a 1.38/cm³.

En el campo, usando cilindros de volumen conocido, se pueden recolectar muestras de suelo, las cuales se someten a secado en una estufa a 110°C por 24-36 horas. Con esta información se procede a calcular la densidad aparente.

Humedad gravimétrica

La cantidad de agua asociada con la unidad de masa o volumen de suelo se conoce como contenido de humedad y tiene mucha importancia cuando se trata de calcular la cantidad de agua que se debe aplicar como riego.

$$W = \frac{\text{Masa de agua}}{\text{Masa suelo seco}} \times 100 \quad (\text{A-2})$$

Las muestras para determinar el contenido gravimétrico de humedad se toman con un barreno a diferentes profundidades en el perfil del suelo y pueden tener entre 100 y 200 g (por muestra). Las muestras se colocan en cajas herméticas para transportarlas al laboratorio, en donde se someten a secado.

Humedad volumétrica (θ)

Cuando el volumen de agua retenido por un suelo se expresa por unidad de volumen se obtiene el contenido volumétrico de humedad.

$$\theta = \frac{\text{Volumen de agua}}{\text{Volumen de suelo}} \times 100 \quad (\text{A-3})$$

Para obtener la humedad volumétrica se recomienda utilizar las mismas muestras tomadas para calcular la densidad aparente.

El contenido volumétrico de humedad también se puede obtener a partir de la humedad gravimétrica usando la siguiente relación:

$$\theta = \% W \times \text{Densidad aparente} \quad (\text{A-4})$$

Capacidad de campo (CC)

La capacidad de campo ha sido definida como la cantidad de agua retenida por un suelo bien drenado después de un riego fuerte o lluvia. Cuando los cambios en el contenido de humedad son pequeños, la capacidad de campo en realidad no corresponde a un valor único sino más bien a un rango de valores en la humedad del suelo. Debido a que el drenaje del agua es lento, estos valores ocurren entre uno y dos días después del riego. La capacidad de campo se afecta por cambios en la textura y la estructura que ocurren en los diferentes horizontes del perfil del suelo. Como resultado de las condiciones locales, la capacidad de campo depende de las condiciones del campo y como tal se debe determinar directamente en éste.

El método de campo consiste en construir una piscina cuadrada pequeña (1 m x 1 m) directamente en el área más representativa del campo. Los bordes de la piscina se construyen con una pala para conformar un dique de unos 15 a 20 cm de altura (Figura A-3). Una vez construido el dique se debe aplicar suficiente agua para llenar la piscina en tres o cuatro oportunidades durante el primer día. Posteriormente, cuando se ha aplicado una lámina significativa (100 mm ó 100 l/m²) se cubre la piscina con un plástico oscuro o con sacos de polipropileno en los que viene la úrea.

Después de 48 horas se pueden tomar muestras a diferentes profundidades y de acuerdo con los horizontes del suelo. La muestra se debe secar en un horno (105°C durante 24 horas) para obtener así el contenido gravimétrico de humedad a capacidad de campo.

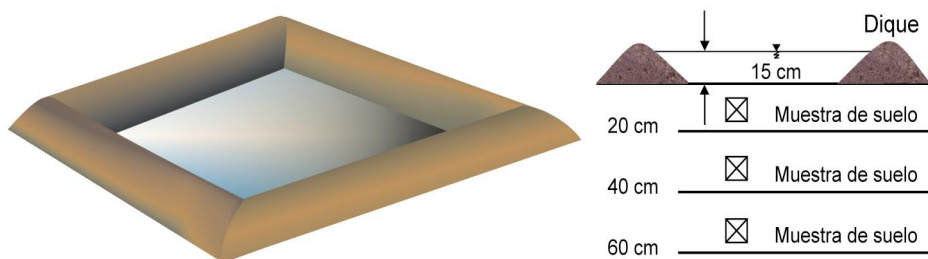


Figura A-3. Esquema de la piscina y sitios de muestreo para la determinación de la capacidad de campo de un suelo.

Punto de marchitamiento permanente (PMP)

De manera similar a la capacidad de campo, el punto de marchitamiento permanente es un término dinámico que corresponde a un rango en el contenido de humedad del suelo donde el suministro de agua no es suficiente para evitar que la planta se marchite. Este valor también está afectado por las condiciones del perfil del suelo y por la conductividad capilar del suelo que controla el flujo de agua hacia la raíz.

El punto de marchitamiento permanente se puede determinar en la finca siguiendo el método biológico, para lo cual se requieren bolsas plásticas de color negro con capacidad para 3 a 4 kilogramos de suelo. Primero se recolecta suficiente suelo de cada horizonte del perfil y se coloca cada uno en una bolsa dejando un espacio libre en la parte superior de ésta. Se pueden sembrar una o dos semillas de soya, frijol o girasol, que son de fácil germinación y establecimiento. En el caso de muestras de horizontes profundos es necesario agregar fertilizantes (nitrógeno, fósforo, potasio: NPK) para asegurar el buen desarrollo de la planta indicadora. Una vez sembradas, se deben regar las bolsas en forma permanente para asegurar el buen desarrollo de las plántulas. Cuando las plantas tengan una altura entre 15 y 20 centímetros se corta el suministro de agua al suelo sellando con cinta la parte abierta de la bolsa. A partir de ese momento se inicia el proceso de observación diaria del vigor de la planta. Llegará el momento en que las plantas muestren signos de sequía. Si durante la noche las plantas no recuperan su turgidez, indica que se ha llegado al rango de marchitamiento. En ese momento, se abren las bolsas y se toman muestras de suelo para determinar el contenido gravimétrico de humedad a punto de marchitamiento.

Lámina de agua

El contenido de humedad de un suelo también se puede expresar como una lámina de agua y tiene como equivalente la altura que alcanzaría el nivel del agua en una piscina con un área de una hectárea. De esta forma, el volumen de agua aplicado puede obtenerse al multiplicar la lámina de riego por el área regada.

$$\theta = \frac{\text{Volumen de agua}}{\text{Volumen de suelo}} = \frac{\text{Lámina de agua} \times 1 \text{ hectárea}}{\text{Profundidad radical} \times 1 \text{ hectárea}} \quad (\text{A-5})$$

$$\theta = \frac{\text{Lámina de agua (mm)}}{\text{Profundidad radical (mm)}} \quad (\text{A-6})$$

$$\text{Lámina de agua} = \theta \times \text{Profundidad radical} \quad (\text{A-7})$$

$$\text{Lámina} = \frac{W \times Da}{100} \times \text{Profundidad radical} \quad (\text{A-8})$$

Lámina de agua aprovechable (LAA)

$$\text{LAA} = \frac{\text{CC} - \text{PMP}}{100} \times Da \times \text{Profundidad radical} \times 10 \quad (\text{A-9})$$

donde:

LAA = lámina de agua aprovechable (mm)

CC = capacidad de campo (% de humedad)

PMP = punto de marchitamiento permanente (% de humedad)

Profundidad radical (cm)

Da = densidad aparente (g/cm³)

Lámina de agua rápidamente aprovechable (LARA)

$$\text{LARA} = \text{LAA} (1 - \text{NH}) \quad (\text{A-10})$$

donde NH corresponde al nivel crítico de humedad

Ejemplo de cálculo

A continuación se presentan las constantes físicas y de humedad para un Mollisols del Ingenio Manuelita, hacienda Gertrudis:

Profundidad (cm)	Textura	Densidad aparente (g/cm ³)	Capacidad de campo (%)	Punto de marchitamiento (%)	LAA	LARA
0-35	FAr	1.35	28.5	15.9	60	30
35-65	Ar	1.51	23.6	17.5	28	14
65-80	LAr	1.57	22.5	16.8	13	6.5

$$LAA = \frac{(CC - PMP)}{100} \times Da \times Profundidad \times 10$$

$$LAA_{0-35} = \frac{(28.5 - 15.9)}{100} \times 1.35 \times 35 \times 10 = 60 \text{ mm}$$

$$LAA_{35-65} = \frac{(23.6 - 17.5)}{100} \times 1.51 \times 30 \times 10 = 28 \text{ mm}$$

$$LAA_{65-80} = \frac{(22.5 - 16.8)}{100} \times 1.57 \times 15 \times 10 = 13 \text{ mm}$$

$$LARA = LAA (1 - NH)$$

$$LARA_{0-35} = 60 \times (1 - 0.5) = 30 \text{ mm}$$

$$LARA_{35-65} = 28 \times 0.5 = 14 \text{ mm}$$

$$LARA_{65-80} = 13 \times 0.5 = 6.5 \text{ mm}$$

$$LARA_{0-80} = 30 \text{ mm} + 14 \text{ mm} + 6.5 \text{ mm} = 50.5 \text{ mm}$$

Pozos de observación

El nivel freático ha sido concebido como el límite superior de las aguas subterráneas libres, donde la presión del agua es atmosférica.

Para dimensionar los problemas de drenaje interno de un campo es necesario conocer los cambios en la profundidad del nivel freático en el espacio y el tiempo, mediante lecturas quincenales o mensuales de los niveles del agua en agujeros o huecos barrenados en el suelo hasta profundidades de 1.8 a 2.0 m. Para asegurar la estabilidad del agujero y evitar la entrada de agua lluvia o de escorrentía se acostumbra instalar tubos de PVC o manguera rígida de polietileno con diámetro entre 2.5 y 5 cm recubiertos con una malla que sirve como filtro (Figura A-4). La lectura de la profundidad del agua en un pozo solamente hace referencia a un punto en el campo; por consiguiente, es necesario instalar una red de pozos que permita conocer la variación espacial de la profundidad del nivel freático. Se recomienda iniciar la red siguiendo un arreglo triangular, el cual se puede ampliar en la medida en que se conozca el comportamiento de las aguas freáticas.

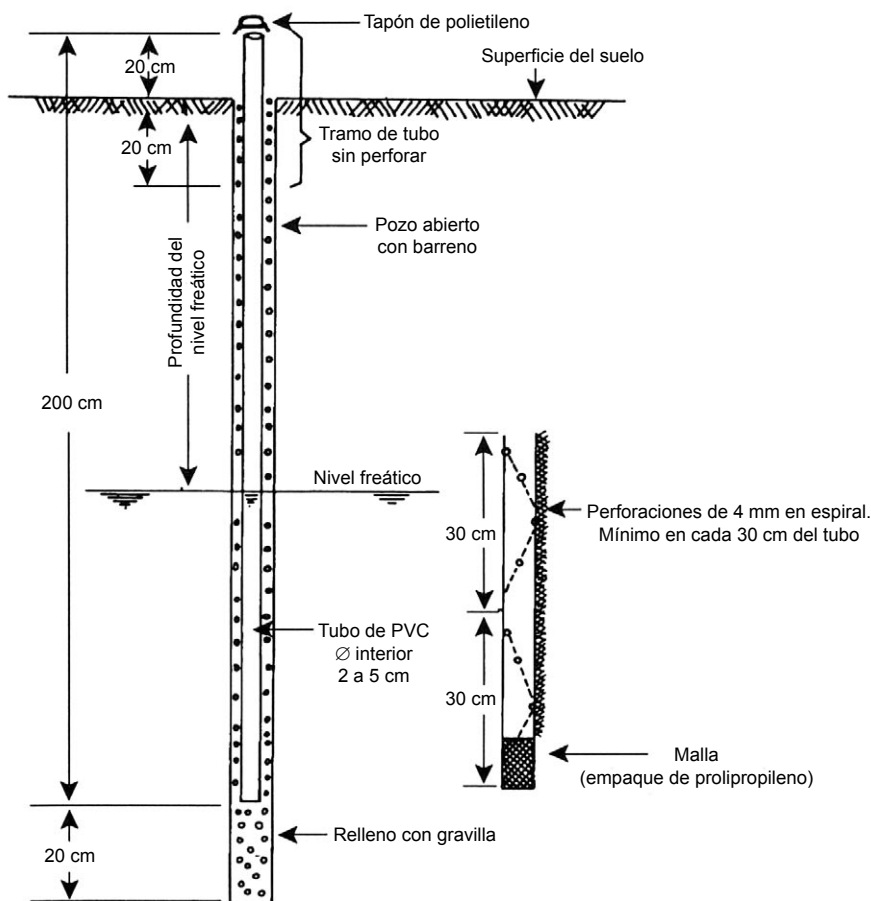


Figura A-4. Pozo de observación del nivel freático.

Uso de politubulares en reemplazo de las acequias de riego

Los politubulares para riego son mangueras planas de polietileno resistente a los rayos ultravioleta, de 12 a 21 pulgadas de diámetro y con un calibre entre 15 y 19 milésimas de pulgada, que se utilizan para conducir y aplicar agua de riego a presiones máximas entre 2 y 3 psi (1.4 - 2.3 m).

Su uso en la agroindustria de la caña es relativamente nuevo. Entre 1988 y 1990 el Ingenio Central Castilla y CENICAÑA evaluaron los politubulares con salidas como reemplazo de las acequias regadoras. Los resultados fueron

satisfactorios con un ahorro de 400 m³ de agua por hectárea y por riego, y un aumento de 21% en la eficiencia de los regadores (Benítez y Cruz, 1994). En 1995, el Ingenio Manuelita y CENICAÑA evaluaron los politubulares y obtuvieron un ahorro de agua de 600 m³ por hectárea y por riego, con un aumento en la eficiencia de los regadores de 47% (Rebolledo, 1997). Como resultado de estos trabajos, en 1998 el Ingenio Manuelita tenía 1200 hectáreas regadas con politubulares con rendimientos entre 1.8 y 2.5 hectáreas/hombre por día y aplicación de 1200 m³ de agua por hectárea y por riego. El Ingenio Manuelita está ampliando el sistema hasta alcanzar 4000 hectáreas de cultivo.

El politubular que se coloca en lugar de la acequia de riego para suministrar el agua directamente a los surcos requiere un niple horizontal (tubo corto de 0.7 m) instalado en la caja de división, cuya columna de agua debe ser suficiente para superar las pérdidas de presión que ocurren en el politubular, sin exceder la presión máxima recomendada para el diámetro dado.

El procedimiento para seleccionar el diámetro del politubular, con un caudal de agua por transportar de 150 l/s en una longitud de 600 m, se ilustra a continuación.

Politubular a nivel

En primer lugar se propone un diámetro de 16 pulgadas, a partir del cual se calculan las pérdidas por fricción (hf) despejándolas de la ecuación de Hazen-Williams, así:

$$Q = 0.2786 CD^{2.63} S^{0.54} \quad (\text{A-11})$$

$$hf = (Q / 0.2786 CD^{2.63})^{1/0.54} * L \quad (\text{A-12})$$

donde:

Q = caudal (m³/s)

C = coeficiente de Hazen-Williams, C = 150 para politubulares.

D = diámetro del politubular (m)

S = hf/L; hf: pérdidas por fricción (m), L: Longitud del politubular (m).

hf = 1.45 m

Estas pérdidas por fricción deben ser menores que la presión máxima recomendada para el diámetro propuesto. Las presiones máximas recomendadas son: 3.5 m para 10 pulgadas; 2.3 m para 12 y 14 pulgadas; 1.4 m para 16, 18 y 21 pulgadas.

En este caso, para el diámetro de 16 pulgadas la presión máxima recomendada es de 1.4 m, o sea que este diámetro no cumple con la norma. Por tanto, se propone otro diámetro mayor (18 pulgadas) y se calculan las pérdidas por fricción para este nuevo diámetro ($h_f = 0.8$ m), las cuales cumplen con la condición mencionada. Por tanto, se selecciona el diámetro de 18 pulgadas.

Politubular en pendiente

Si la pendiente es de 0.2%, entonces al valor calculado de las pérdidas por fricción (1.4 m) para el diámetro de 16 pulgadas se le resta la ganancia de presión por efecto de la pendiente, que en este caso es de 1.2 m ($0.2 \text{ m}/100 \text{ m} \times 600 \text{ m}$). El resultado es de 0.2 m, bastante menor que la máxima recomendada (1.4 m), lo cual indica que se podría ensayar con un diámetro menor, por ejemplo 14 pulgadas, para el cual las pérdidas por fricción son de 2.7 m y al restarle 1.2 m da un valor de 1.6 m. Estas pérdidas son mayores que la presión máxima recomendada, lo cual indica que para esta condición de pendiente el diámetro adecuado es de 16 pulgadas.

En el Cuadro A-1 se presentan los diámetros de politubulares sugeridos de acuerdo con los caudales de agua manejados para riego y la pendiente del terreno. La experiencia en el valle del río Cauca muestra que los politubulares con diámetro entre 14 y 16 pulgadas (38 y 46 cm) pueden dar buenos resultados para caudales entre 80 y 100 l/s en lotes con pendientes entre 0.2% y 0.5%.

Cuadro A-1. Diámetros de politubulares de acuerdo con el caudal y la pendiente del terreno para una longitud de 600 m.

Caudal (l/s)	Pendiente (%)	Diámetro sugerido		Carga de presión en estructura de entrega (m)
		(pulgadas)	(cm)	
80	0	14	36	0.9
80	0.2	12	30	0.6
80	0.3	12	30	0.3
100	0	16	41	0.7
100	0.2	14	36	0.3
100	0.3	14	36	0.3
150	0	18	46	0.8
150	0.2	16	41	0.3
150	0.3	16	41	0.3

En el Ingenio Manuelita, utilizando politubulares de 18 pulgadas con caudales entre 100 y 140 l/s y compuertas de 3.5 pulgadas de diámetro, ha sido posible aplicar caudales de 6 l/s por surco. Lo anterior permite manejar conjuntos de 30-40 surcos de riego en forma simultánea por el método de surco alterno.

Instalación

A continuación se presentan algunas recomendaciones generales para la instalación del sistema politubular para riego en caña de azúcar.

1. La carga de presión en la estructura de entrega del agua al politubular debe ser un poco mayor que las pérdidas por fricción más la carga estática. En cualquier caso su valor mínimo debe ser de 0.15 m, mientras que el máximo no puede superar la presión máxima recomendada para el diámetro dado. En esta estructura, para conectar el politubular, a 0.2 m del fondo se coloca un cilindro metálico horizontal con una longitud entre 0.7 y 1.0 m y diámetro ligeramente menor que el del politubular.
2. Para evitar la entrada de sedimentos se recomienda construir trampas próximas a la estructura de captación de agua; y para impedir el ingreso de basura al politubular, colocar una rejilla removible con orificios entre 12 y 15 cm² en el sitio de entrega del agua.
3. Construya un surco de 10 cm de profundidad en la cabecera del campo para colocar el politubular y evitar que se voltee al momento del llenado. Este surco debe estar nivelado con una pendiente uniforme (0.2% - 0.5%) y libre de piedras y materiales que puedan romper el politubular.
4. Ensamble el politubular en la estructura de entrega del agua formando una capa doble en el sitio de unión y colocando bandas de caucho fabricadas con neumáticos.
5. Haga el llenado en forma lenta colocando previamente bandas de caucho a distancias entre 40 y 60 m con el fin de garantizar el sostenimiento del politubular.
6. Una vez se inicia el llenado, identifique los puntos donde se producen bolsas de aire y proceda a colocar tubos pequeños de purga. En el momento que el politubular se pueda comprimir fácilmente hasta la mitad de su diámetro, perfórelo con un sacabocados en los puntos de entrega de agua a los surcos de cultivo iniciando desde la cabecera. A continuación instale las compuertas.

Manejo y almacenamiento

Los politubulares pueden permanecer en el campo durante el ciclo de riego del cultivo (hasta 10 meses). También pueden ser transportados entre diferentes campos, caso en el cual se deben instalar en tramos entre 60 y 100 m de longitud (entre 30 y 40 kg de peso) para facilitar su manejo. Las uniones entre estos tramos deben tener 40 cm de longitud, ser rígidas y livianas, con un diámetro ligeramente menor que el del politubular. Estas uniones se introducen primero en el tubular extendido, sujetándolas con bandas de caucho.

En el momento de retirar los politubulares del campo se deben drenar completamente desacoplando los accesorios antes de proceder a enrollarlos o doblarlos para guardarlos en un lugar seco y libre del ataque de roedores. Los bordes de los pliegues son los puntos más vulnerables, por tanto se debe tener especial cuidado en su manejo.

Uso de tubería de PVC con compuertas para riego por surcos

La utilización de tubería rígida con compuertas para riego por surcos se inició en el valle del río Cauca en 1994 como una alternativa al uso de los politubulares en reemplazo de las acequias de riego. Este sistema de riego utiliza tubería de PVC de diámetro entre 8 y 12 pulgadas y requiere una presión entre 3 y 23 psi (21-158 kPa) equivalente a una carga hidráulica de 2 a 16 m. Esta presión puede ser suministrada por un pozo o una bomba de baja presión a partir de la cual se instala la tubería principal en PVC de 10 a 12 pulgadas, enterrada, con hidrantes para conectar la tubería secundaria portátil en PVC de 8 a 10 pulgadas de diámetro con compuertas corredizas que se instalan a las distancias requeridas de acuerdo con el espaciamiento entre surcos. Esta tubería debe tener tratamiento contra los rayos ultravioleta del sol, ser liviana, flexible y fácil de acoplar y desacoplar.

La tubería rígida con compuertas permite un ahorro mayor de 400 m³/ha cuando se conecta a tubería de conducción con hidrantes. La operación se limita al cambio de tubería y a abrir y cerrar compuertas. El área regada puede ser superior a las 5 ha/hombre por día.

De otra parte, se eliminan las acequias regadoras, las conductoras y también se pueden eliminar los reservorios liberando área para siembra. Se puede controlar exactamente la cantidad de agua aplicada a cada surco, inclusive trabajando de noche, lo cual es más fácil cuando se cuenta con un medidor de caudal colocado en la estación de bombeo.

El agua en la tubería puede avanzar en contra de la pendiente y adaptarse a montículos y depresiones, haciendo menos exigente la nivelación del terreno. Cabe anotar que es deseable que el área sea de geometría regular debido a la rigidez de la tubería.

La carga de presión en el punto de entrega del agua a la tubería de PVC debe ser suficiente para compensar las pérdidas de carga más la carga estática pero sin exceder la carga máxima de 20 psi (14 m). 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 es admisible para tuberías de PVC principales (sin compuertas).

Para seleccionar el diámetro de la tubería de PVC es necesario calcular las pérdidas por fricción mediante la ecuación de Hazen-Williams:

$$Q = 0.2786 \text{ C D}^{2.63} \text{ S}^{0.54}$$

donde:

Q = caudal (m³/s)

C = coeficiente de Hazen-Williams, C = 150 para tuberías de PVC

D = diámetro de la tubería (m),

S = hf/L; hf: pérdidas por fricción (m), L: longitud de la tubería (m)

Los diámetros comerciales de tubería de PVC para nuestro medio son 6, 8 y 10 pulgadas. La velocidad ideal de diseño es de 1.5 m/s.

Para ilustrar la forma de seleccionar el diámetro de la tubería a continuación se presentan tres casos para un caudal de 150 l/s y longitud de 600 m.

Tubería de PVC a nivel

Se propone un diámetro de 10 pulgadas y se calculan las pérdidas por fricción (hf) a partir de la ecuación de Hazen-Williams, así:

$$hf = (Q / 0.2786 \text{ C D}^{2.63})^{1/0.54} * L$$

$$hf = 14.1 \text{ m}$$

Esta pérdida por fricción debe ser menor que la carga máxima recomendada para tuberías de PVC (RDE 75), que en este caso es de 20 psi (14 m), o sea que debe aumentarse el diámetro a 12 pulgadas, con el cual la h_f es de 5.8 m, que es menor que la máxima recomendada.

Tubería de PVC en pendiente

Si la pendiente es de 0.2%, al valor de las pérdidas por fricción para 10 pulgadas (14.1 m) se le resta la ganancia de carga hidráulica por efecto de la pendiente, que en este caso es de 1.2 m ($0.2 \text{ m}/100 \text{ m} \times 600 \text{ m}$) y esto da un valor de $14.1 - 1.2 = 12.9 \text{ m}$. Este valor es menor que la máxima recomendada de 14 m y por tanto el diámetro seleccionado es de 10 pulgadas.

Tubería de PVC en contrapendiente

Si la pendiente del terreno es de 0.3% hacia arriba, la carga estática para la longitud de 600 m es de 2 m. A la pérdida de carga por fricción correspondiente al diámetro de 10 pulgadas (14.1 m) se le añade esta carga estática y el resultado es de 16.1 m, que es mayor que la máxima recomendada. Por tanto el diámetro debe incrementarse a 12 pulgadas, para el cual las pérdidas por fricción (5.8 m) más la carga estática dan un valor de 7.8 que es menor que la máxima.

Instalación

Para la instalación de la tubería principal que va enterrada se excava una zanja de 60 cm de profundidad mínima, cuyo fondo debe quedar libre de piedras o rocas. Se colocan los tubos y se procede a unirlos limpiándolos previamente para colocar el sello de caucho, aplicar el lubricante, alinear la tubería en ambos planos, insertar el espigo en la unión y aplicar la fuerza final para que queden unidos. Luego se procede a compactar alrededor de la tubería, con pisón de mano, el material de relleno de la misma excavación pero libre de piedras.

En ciertos puntos críticos de la conducción se pueden presentar vacíos o presiones por debajo de la presión atmosférica. En estos sitios se deben instalar ventosas o válvulas que permitan la entrada de aire en el momento que se presente el vacío. Tales puntos pueden ser: (1) Salida de las bombas, inmediatamente después del registro; (2) Salida de un reservorio alto, después del registro y (3) Puntos altos donde cambia el sentido de la pendiente.

Para prevenir golpes de ariete es importante mantener la velocidad del agua en las tuberías por debajo de 2 m/s. Además se debe operar lentamente la válvula de corte.

Sifones para riego por surcos

Los sifones son tubos cortos contruidos de plástico, caucho, aluminio o PVC, que se moldean para facilitar su instalación en el canal de riego. El uso de los sifones permite la entrega de caudales definidos a cada surco de riego, sin necesidad de romper el talud de las acequias regadoras. La descarga de un tubo-sifón está determinada por: (1) Diámetro del tubo, (2) Longitud del tubo, (3) Rugosidad y curvatura del tubo, y (4) Carga o cabeza de operación del sifón.

Cuando el extremo de salida del agua no está sumergido, la carga de trabajo se mide por la diferencia de altura entre el nivel del agua en el canal y el extremo inferior del sifón. De otra parte, el extremo inferior del sifón, que entrega el agua al surco, puede estar sumergido; para lo cual es necesario medir la carga de trabajo como la diferencia entre el nivel del agua en el canal y el nivel del agua en el surco de riego (Figura A-5).

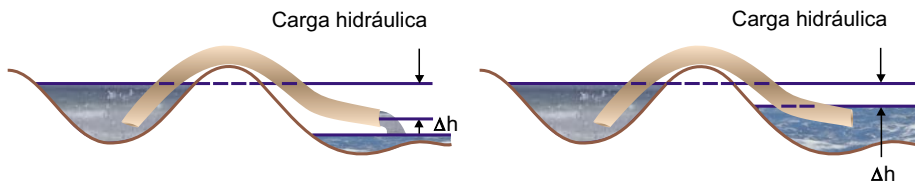


Figura A-5. Ilustración para la determinación de la carga de trabajo de los sifones.

Los sifones se deben instalar en canales de riego con poca pendiente, de tal manera que se pueda mantener una carga constante de operación en cada sifón. Durante la instalación es necesario llenar el tubo completamente con agua. Para ello se sumerge todo el tubo en el canal de riego y luego se remueve con el extremo inferior sellado; una vez se coloca el sifón sobre el terreno el agua empieza a fluir hacia el surco. También se acostumbra sumergir un extremo del sifón en el canal mientras se realiza el llenado usando la mano como una válvula de cebado.

Para el riego por surcos en caña de azúcar se usan sifones de 1.5, 2.0 y 3.0 pulgadas de diámetro contruidos con tramos de tubería sanitaria de PVC con una longitud de 1.5 a 1.7 metros. En la Figura A-6 se presentan las curvas de aforo en función de la carga de trabajo y el diámetro de los sifones más usados en el valle del río Cauca para el riego de la caña de azúcar.

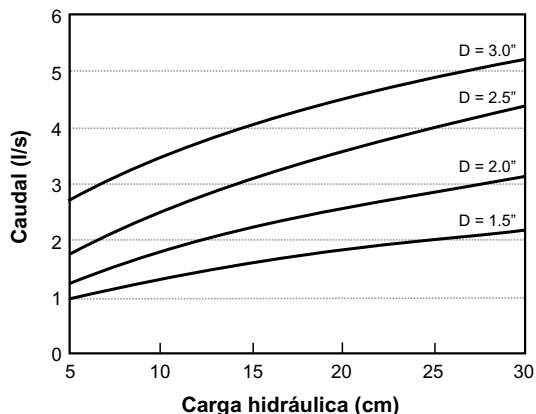


Figura A-6. Curvas de aforo para sifones de PVC utilizados para la entrega del agua a los surcos en el riego de la caña de azúcar.

Aforador de orificio para tuberías y pozos

Los orificios circulares se colocan dentro o al final del tubo de descarga de los pozos profundos para medir caudales entre 3 y 150 l/s (Figura A-7). El tubo de la descarga debe estar a nivel y tener un tramo recto de longitud superior a 1.8 metros. A una distancia de 60 centímetros de la salida de la tubería se coloca un piezómetro para medir la cabeza de presión en el tubo de la descarga.

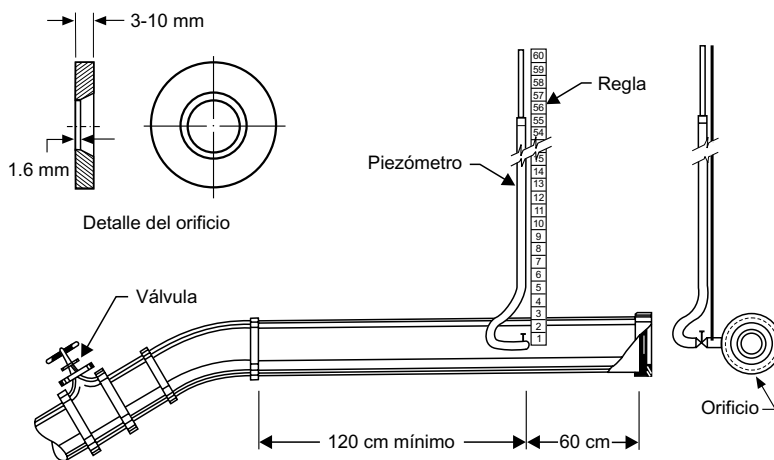


Figura A-7. Orificio circular para el aforo de pozos con descarga ente 3 y 150 litros por segundo (tomado de: Groundwater and Wells, 1986, 2ª. Ed. Johnson Division, St. Paul, Minnesota, 1089 p.)

El piezómetro consiste en un tubo de plástico transparente con una longitud entre 1.2 y 1.5 metros, el cual se conecta por medio de un niple a la parte media lateral de la tubería de descarga. El niple debe quedar a ras con la pared interior de la tubería, pues de lo contrario interfiere con la medida correcta de la cabeza en el orificio.

Para cualquier diámetro de tubería y orificio, el caudal que pasa por el orificio cambia de acuerdo con la cabeza de presión medida en el piezómetro. El caudal que pasa a través del orificio está determinado por la ecuación:

$$Q = \frac{CA\sqrt{2gH}}{1000} \quad (\text{A-13})$$

donde:

Q = volumen de agua por unidad de tiempo (l/s).

A = área del orificio (cm²)

g = aceleración de gravedad (980 cm/s²)

H = altura del nivel del agua en el piezómetro (cm)

C = coeficiente de descarga del orificio (varía de acuerdo con la relación entre el diámetro del orificio y la tubería de la descarga).

El coeficiente de descarga se puede obtener del cuadro siguiente:

Relación = $\frac{\text{Diámetro orificio}}{\text{Diámetro tubería}}$	Coeficiente de descarga (C)
0.50 - 0.55	0.59
0.55 - 0.60	0.61
0.60 - 0.65	0.63
0.65 - 0.70	0.66
0.70 - 0.75	0.69
0.75 - 0.80	0.73

Tabla de calibración para aforadores RBC

A continuación se presenta la tabla de aforo para las secciones más comunes de aforadores RBC usados en el valle del río Cauca en canales de conducción y en riego por surcos.

TABLA DE AFORO PARA SECCIONES MÁS COMUNES, AFORADOR RBC

Surcos		Canal terciario		Canal secundario		Canal primario	
$B_1 = 0.05 \text{ m}$		$B_1 = 0.60 \text{ m}$		$B_1 = 0.80 \text{ m}$		$B_1 = 1.20 \text{ m}$	
$B_c = 0.01 \text{ m}$		$B_c = 1.00 \text{ m}$		$B_c = 1.70 \text{ m}$		$B_c = 3.20 \text{ m}$	
$Z = 2.00$		$Z = 1.00$		$Z = 1.50$		$Z = 2.00$	
$S = 0.05 \text{ m}$		$S = 0.20 \text{ m}$		$S = 0.30 \text{ m}$		$S = 0.50 \text{ m}$	
$L_a = 0.30 \text{ m}$		$L_a = 1.20 \text{ m}$		$L_a = 1.20 \text{ m}$		$L_a = 4.00 \text{ m}$	
$L_b = 0.05 \text{ m}$		$L_b = 0.60 \text{ m}$		$L_b = 0.90 \text{ m}$		$L_b = 1.50 \text{ m}$	
$L_c = 0.15 \text{ m}$		$L_c = 1.70 \text{ m}$		$L_c = 1.70 \text{ m}$		$L_c = 5.00 \text{ m}$	
H (cm)	Q (l/s)	H (cm)	Q (l/s)	H (cm)	Q (l/s)	H (cm)	Q (l/s)
2.0	0.5	17	138	20	301	20	506
2.2	0.6	19	168	22	354	22	596
2.4	0.7	21	200	24	412	24	692
2.6	0.8	23	234	26	474	26	794
2.8	0.9	25	272	28	540	28	903
3.0	1.0	27	312	30	610	30	1018
3.2	1.1	29	355	32	685	32	1139
3.4	1.2	31	401	34	764	34	1267
3.6	1.4	35	501	36	848	36	1401
3.8	1.5	37	556	38	935	38	1542
4.0	1.6	39	613	40	1028	40	1690
4.2	1.8	41	674	42	1126	42	1844
4.4	1.9	43	737	44	1227	44	2005
4.6	2.1	45	804	46	1334	46	2172
4.8	2.2	47	874	48	1445	48	2347
5.0	2.4	49	946	50	1561	50	2528
5.2	2.6	51	1022	52	1682	52	2716
5.4	2.8	53	1102	54	1808	54	2912
5.6	3.0	55	1184	56	1938	56	3114
5.8	3.1	57	1270	58	2074	58	3322
6.0	3.2	59	1359	60	2215	60	3539
6.2	3.6	63	1547	62	2361	62	3763
6.4	3.8	65	1646	64	2512	64	3994
6.6	4.0	67	1749	66	2668	66	4232
6.8	4.2	69	1855	68	2830	68	4477
7.0	4.4	71	1965	70	2997	70	4730
7.2	4.5	73	2078	72	3169	72	4991
7.4	4.9	75	2195	74	3345	74	5259
7.6	5.2	77	2316	76	3528	76	5535
7.8	5.4	79	2440	78	3717	78	5818
8.0	5.7	81	2568	80	3911	80	6109
8.2	5.9	83	2700	82	4111	82	6408
8.4	6.2	85	2836	84	4316	84	6715
8.6	6.5	87	2975	86	4527	86	7029
8.8	6.8	89	3119	88	4744	88	7352
9.0	7.1	91	3266	90	4967	90	7683
9.2	7.4	93	3417	92	5196	92	8021
9.4	7.7	95	3573	94	5431	94	8368
9.6	8.0	97	3732	96	5671	96	8723
9.8	8.4	99	3895	98	5918	98	9087
10.0	8.7	100	3979	100	6171	100	9459

H: altura del nivel del agua en el piezómetro.

Q: caudal o volumen de agua por unidad de tiempo.

Lista de abreviaturas y siglas

De términos técnicos

A	Área del orificio de aforo
AA	Agua aprovechable
Ar	Arcillosa (textura)
ARA	Agua rápidamente aprovechable
B ₁	Ancho de la plantilla (aforador RBC)
Bc	Ancho de la cresta (aforador RBC)
C	Factor de conversión: coeficiente de Hazen-Williams/coeficiente de descarga
CC	Capacidad de campo
CHS	Cambios en la humedad del suelo
D	Diámetro (politubular)
Da	Densidad aparente
Es	Escorrentía
Et	Evapotranspiración
Etp	Evapotranspiración potencial
Ev	Evaporación
EVA	Evaporación en el tanque Clase A
EVC	Evaporación en el tanque Cenírrómetro
Ex	Exceso
FAr	Franco-arcillosa (textura)
H	Altura del nivel del agua en el piezómetro
hf	Pérdidas por fricción (politubulares)
K	Factor del cultivo (K del tanque evaporímetro)
La	Distancia de la rampa a la regla de aforo (aforador RBC)
LAA	Lámina de agua aprovechable
LAr	Limo-arcillosa (textura)
LARA	Lámina de agua rápidamente aprovechable

LAS	Lámina de agua en el suelo
Lb	Longitud de la rampa (aforador RBC)
Lc	Longitud de la cresta (aforador RBC)
NF	Nivel freático
NH	Nivel crítico de humedad
P	Precipitación
Pe	Pérdidas por escorrentía
PMP	Punto de marchitamiento permanente
Pp	Pérdidas por percolación profunda
Q	Volumen de agua por unidad de tiempo (caudal)
R	Riego
RDE	Relación diámetro-espesor
RBC	Aforador RBC
S	Altura de la rampa o cresta (aforador RBC)
T	Tirante (aforador RBC)
Tr	Transpiración
Y ₁	Lectura de la superficie del agua en regla de aforo (aforador RBC)
Yc	Tirante crítico medido sobre la cresta (aforador RBC)
W	Contenido gravimétrico de humedad
Z	Inclinación del talud (aforador RBC)
θ	Contenido volumétrico de humedad

De instituciones

CENICAFÉ	Centro Nacional de Investigaciones de Café “Pedro Uribe Mejía”
CENICAÑA	Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia
CIAT	Centro Internacional de Agricultura Tropical
CVC	Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
USWB	<i>United States Weather Bureau</i>

Referencias bibliográficas

- Benítez C., E.; Cruz V., R. 1994. Evaluación hidráulica y económica de politubulares con orificios para riego por surcos en caña de azúcar. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Agrícola. Universidad del Valle.
- Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia. Cali. 2003. Balance Hídrico versión 3.0. Manual del Usuario. Cali, CENICAÑA. 50 p. (incluye CD)
- Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia. Cali. Informe del macroproyecto Alta Sacarosa Estable. 1997. Manejo de aguas. Curva del factor K. Informe trimestral oct.-dic. 1997. Cali, CENICAÑA.
- Domínguez, P.; Torres, J.S. 1995. Sistema radical de caña en suelos del Valle del Cauca, Colombia. *International Sugar Journal*. v.97, no.1154, febrero. p.60, 91-95
- Cruz V., R.; Posada, C.; Lemos, R.D.; Valdés, A. 2003. Comparación entre politubulares y tuberías de PVC con compuertas para riego por surcos. En: Congreso Colombiano de la Asociación de Técnicos de la Caña de Azúcar, 6, Cali, 24-26 sept., 2003. Memorias. Cali, TECNICAÑA, v.1, p.122-133.
- Gómez P., J. F.; Prada, M. A.; Gutiérrez, C. 1998. Nuevas tecnologías de riego en el Ingenio Manuelita. Carta Trimestral, CENICAÑA (Colombia). v.20, no.4, p.23-29
- Quintero, R.; Castilla, C. 1992. Agrupación de los suelos del valle geográfico del río Cauca. Cali. CENICAÑA. 19 p. (mapa) (Serie Técnica no.08)
- Rebolledo R., J.P. 1997. Evaluación operativa del riego con politubulares. En: Congreso de la Sociedad Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar, 4, Cali, 24-26 sept., 1997. Memorias. Cali, TECNICAÑA, v.1, p.229-242.
- Ruiz M., R.; Cruz V., R. 2000. Diseño de campo. Riego por pulsos y drenaje superficial en el sistema de cosecha de caña verde. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Agrícola. Universidad del Valle.
- Torres, J.S.; Carbonell G., J.; Ortiz U., B.V.; Daza, O.H.; Cruz V., R.; Villegas T., F. 2000. Grupos de humedad para el manejo del cultivo en condiciones difíciles. Cali. Cenicaña. 16 p. (Documento de trabajo no.441) (Presentado en Congreso Colombiano de la Asociación de Técnicos de la Caña de Azúcar, 5, Cali, 4-6 oct, 2000)
- Torres, J. S.; Cruz V., R.; Villegas T., F. 1997. Riego por surco alterno en caña de azúcar. En: Congreso de la Sociedad Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar, 4, Cali, 24-26 sept., 1997. Memorias. Cali, TECNICAÑA, v.1, p.191-199.
- Torres, J. S.; Cruz V., R.; Villegas T., F. 1996. Avances técnicos para la programación y manejo del riego en caña de azúcar. Cali, CENICAÑA. 53 p. (Serie Técnica no.19)
- Torres, J.S.; Cruz V., R. 1995. El Cenirrómetro. 2 ed. Cali, CENICAÑA. 4 p. (Serie Divulgativa no.03)
- Torres, J.S. 1995. Riegos. En: El cultivo de la caña de azúcar en la zona azucarera de Colombia. Cali, CENICAÑA. p.193-210

El Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (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) en representación de la agroindustria azucarera localizada en el valle del río Cauca.

Su misión es contribuir por medio de la investigación, evaluación y divulgación de tecnología y el suministro de servicios especializados al desarrollo de un sector eficiente y competitivo, de manera que éste juegue un papel importante en el mejoramiento socioeconómico y en la conservación de un ambiente productivo, agradable y sano en las zonas azucareras.

CENICAÑA desarrolla programas de investigación en Variedades, Agronomía y Procesos de Fábrica, y cuenta con servicios de apoyo en Análisis Económico y Estadístico, Información y Documentación, Tecnología Informática, Cooperación Técnica y Transferencia de Tecnología.

Los recursos de financiación durante 2004 corresponden a donaciones directas realizadas por los ingenios azucareros Carmelita, Central Castilla, Central Tumaco, Incauca, La Cabaña, Manuelita, María Luisa, Mayagüez, Pichichí, Providencia, Riopaila, Risaralda, Sancarlos y Sicarare, y por sus proveedores de caña. Desde 1996 adelanta proyectos cofinanciados por otras entidades, principalmente en el marco de programas coordinados por el Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología "Francisco José de Caldas" (COLCIENCIAS).

La Estación Experimental está ubicada en el corregimiento de San Antonio de los Caballeros (Florida, Valle del Cauca) donde se encuentran las oficinas de administración e investigación, la biblioteca, los invernaderos y los laboratorios de servicios analíticos. Ocupa 62 hectáreas localizadas a 3°21' de latitud norte, 76°18' de longitud oeste y 1024 metros sobre el nivel del mar. En este sitio la temperatura media anual es de 23.5 °C, precipitación media anual de 1160 mm y humedad relativa de 77%.

Las investigaciones sobre el cultivo se realizan en la estación experimental y en predios de los ingenios azucareros y los cultivadores de caña. Las investigaciones de fábrica se llevan a cabo en plantas industriales seleccionadas como ingenios piloto.

CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR DE COLOMBIA. 2003