

Serie Técnica No. 19

# CENTRO DE INVESTIGACION DE LA CAÑA DE AZUCAR DE COLOMBIA

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

JORGE S. TORRES A., I. Agr. Ph.D. RICARDO CRUZ V., I. A. M.Sc. FERNANDO VILLEGAS T., I. A.

> Cali, Colombia Diciembre de 1996

#### **CITA BIBLIOGRAFICA**

TORRES A., J. S.; CRUZ V., R.; VILLEGAS T., F. Avances técnicos para la programación y manejo del riego en caña de azúcar. Cali, CENTRO DE INVESTIGACION DE LA CAÑA DE AZUCAR DE COLOMBIA, diciembre de 1996. 56 págs.

#### Edición:

Victoria Carrillo, C.S. Camilo Isaacs E., I.A. Servicio de Cooperación Técnica y Transferencia de Tecnología

# Diseño y Diagramación:

Jorge Gallego Lenis

Tiraje: 2000 ejemplares

# Impresión:

Feriva

Cali, Colombia

# **CONTENIDO**

l.	Sistema Suelo - Agua	1
	El agua en el suelo	1
	Mecanismos de retención de humedad	2
	Agua aprovechable	3
II.	Sistema Planta - Agua	7
	Absorción de agua	7
	Transpiración	7
	Evapotranspiración	8
	Requerimientos de riego	9
III.	Fuentes de Agua	11
	Manejo del agua	11
	Medición del agua	14
IV.	Programación de Riegos	17
	Balance hídrico	18
	Balance diario	20
	Balance semanal	21
	Programación con pozos de observación	21
	Programación con el Cenirrómetro	23
	Ejemplo de cálculo del balance hídrico	27
	Balance diario	27
	Balance semanal	29
V.	Requerimientos de riego de acuerdo con la siembra/cosecha	31
VI.	Zonificación climática por Balance Hídrico	33

VII.	Apéndice41
	Propiedades físicas41
	Separados del suelo41
	Textura41
	Textura al tacto41
	Textura por análisis mecánico42
	Estructura43
	Densidad aparente44
	Humedad gravimétrica44
	Humedad volumétrica44
	Capacidad de campo45
	Punto de marchitamiento permanente46
	Lámina de agua46
	Lámina de agua aprovechable47
	Lámina de agua rápidamente aprovechable47
	Ejemplo de cálculo47
	Pozos de observación
	Sifones para riego por surcos48
	Aforador de orificio para tuberías y pozos50
	Tabla de calibración para aforadores RBC 53

#### ABREVIATURAS MAS UTILIZADAS

A = Area del orificio de aforo

AA = Agua aprovechable

Ar = Arcillosa

ARA = Agua rapidamente aprovechable
B = Ancho de la plantilla (Aforador RBC)

Bc = Ancho de la cresta

C = Factor de conversión

CC = Capacidad de campo

CHS = Cambios en la humedad del suelo

Da = Densidad aparenta

Es = Escorrentia

Et = Evapotranspiración

Etp = Evapotranspiración potencial

Ev = Evaporación

EVA = Evaporación en el tanque clase A

EVC = Evaporación en el tanque cenirrómetro

FAr = Franco-arcillosa

H = Altura del nivel del agua en el piezómetro

K = Factor del cultivo (K del tanque evaporímetro)La = Distancia de la rampa a la regla de aforo (RBC)

LAA = Lámina de agua aprovechable

LAr = Limo-arcillosa

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 escorrentia

PMP = Punto de marchitamiento permanente

Pp = Pérdidas por percolación profunda

Q = Volumen de agua por unidad de tiempo (caudal)

R = Riego

RBC = Aforador RBC

S = Altura de la rampa

T = Tirante

Tr = Transpiración

W = Contenido gravimétrico de humedad Z = Inclinación del talud (Aforador RBC)  $\theta$  = Contenido volumétrico de humedad

# 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 de rutina, y es así como el 95% del área cultivada recibe riegos suplementarios.

La precipitación en años normales oscila entre 800 y 2600 mm, dependiendo de la ubicación en el Valle, y durante el año se presentan dos períodos lluviosos que abarcan los meses de marzo a mayo y septiembre a noviembre.

La topografía, en general, es plana, con pendientes inferiores al 1.5%. En los últimos años, el área cultivada con caña para azúcar se ha incrementado de 135.000 ha en 1984 a 185.000 en 1996. Este hecho ha desplazado el cultivo de la caña hacia zonas del piedemonte de las cordilleras y a otras regiones con pendientes limitantes para la aplicación del riego por surcos.

La disponibilidad de agua para riego ha decrecido notablemente durante los últimos años por cambios en la cantidad y frecuencia de las lluvias, como también por las mayores demandas de agua para uso municipal e industrial. En esta región es normal 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, es necesario tener en cuenta el aporte de agua freática en la programación de los riegos por balance hídrico.

El objetivo de la presente publicación es propender por el uso eficiente del agua de riego y por la adopción del balance hídrico a nivel comercial, optando por presentar 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 aceptación del balance hídrico como una herramienta de programación de los riegos es incipiente; razón por la cual CENICAÑA ha venido investigando diferentes alternativas que permitan su adopción a escala comercial.

El balance hídrico ha sido considerado como una tecnología que permite 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 balance hídrico resultará en una economía inmediata de agua.

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

# I. Sistema Suelo - Agua

El suelo corresponde al manto superficial de la corteza terrestre que ofrece nutrimentos, anclaje mecánico a las plantas y sirve como medio de almacenamiento de agua para los seres vivientes. La importancia del suelo como un reservorio de agua no es siempre 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 otros gases. 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.

Un suelo normal en el valle del río Cauca puede almacenar alrededor de 4000 m³/ha de agua (400 milímetros) en los primeros 100 centímetros de profundidad; de los cuales, un 50% puede ser extraído como agua aprovechable por las plantas. De esta manera, el suelo actúa como un reservorio de agua para las plantas que nos 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 por 65 m² de un cultivo de caña, en donde anualmente se podrían producir alrededor de 100 kg de azúcar. La disponibilidad futura de agua dependerá de la eficiencia de su uso, a todo nivel.

# El agua en el suelo

Los suelos están integrados por partículas minerales que varían en tamaño, proporción y que 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 permite a las partículas individuales agruparse para formar agregados, dentro de los cuales existen espacios vacíos en donde se almacenan el agua y el aire del suelo.



La forma como se agrupan las partículas del suelo dan origen a grupos estructurales conocidos como: laminar, prismática, 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 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 suministro de nutrimentos para la plantas. Cada uno de los factores anteriores está ligado directa o indirectamente al tamaño y 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 bajo volumen total de poros, dando como resultado baja capacidad de almacenamiento de agua. A estos suelos es necesario regarlos con frecuencia para evitar que el cultivo sufra por déficit de humedad, especialmente en los períodos secos. De otra parte, los suelos arcillosos, que son 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, en los suelos arcillosos los riegos se requieren con menor frecuencia que en los suelos arenosos. Los suelos francos presentan características intermedias de almacenamiento de humedad entre los suelos arenosos y arcillosos; lo cual representa ventajas desde el punto 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 y 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 produciendo 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 a nivel de 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 interfse agua-aire, los poros individuales del suelo se han simplificado y homologado

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. Es por esta razón que 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 a 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 permite 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 es también negativa; hecho que se pone de manifiesto por el trabajo que deben realizar las plantas para extraerle la humedad al suelo. El concepto anterior se puede explicar también a partir de las fuerzas matriciales, las fuerzas osmóticas y de 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, permite 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 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. Cuando todos los poros están llenos de agua, se dice que el suelo está "saturado". En este momento, las fuerzas de retención son nulas, y el valor del potencial mátrico es igual a cero (Figura 1). Después de un riego o lluvia viene el proceso de redistribución, inicialmente con predominio de la fuerza de gravedad que obliga a la salida del agua de los macroporos. En este 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 este momento corresponde a un valor que, dependiendo de la textura del suelo, oscila entre -10 y -33 kilopascales (-0.10 a -0.33 bars). El valor de capacidad de



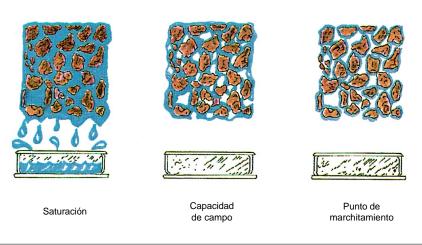


Figura 1. Representación gráfica de las constantes de humedad del suelo. (Adaptado de: The Nature and Properties of Soils. Buckman, H.O. y N.C. Brady. 1969).

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 a 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 y 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 kiloPascales (-15 bars).

El contenido de humedad del suelo no es el mejor criterio para describir la disponibilidad de humedad para las plantas; sin embargo, son valores muy útiles para determinar los requerimientos de agua y 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 el punto de marchitamiento permanente (PMP).

Existe controversia acerca de la disponibilidad de humedad para las plantas entre CC y 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 al PMP. 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, ésta es retenida con mayor fuerza y las plantas deben realizar un mayor esfuerzo para extraer la humedad. En ese momento, la evapotranspiración ocurre a un ritmo inferior al potencial, conocido como

evapotranspiración actual (Et). Dentro de este rango de disponibilidad de humedad existe un punto crítico a partir del cual el ritmo 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 CC y NH, se conoce con el nombre de "AGUA RAPIDAMENTE APROVECHABLE" (ARA); y cuando este valor se expresa en términos de lámina, se conoce como "LAMINA DE AGUA RAPIDAMENTE APROVECHABLE" (LARA).

A partir de 1980, CENICAÑA inició la determinación de las características hídricas de los suelos más representativos del valle geográfico 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.

Evaluaciones directas del patrón de crecimiento y distribución de las raíces de la caña realizadas en el campo, mostraron que en los primeros 40 cm del suelo superficial se concentran entre 85 y 92% de las raíces de la caña. Por consiguiente, para calcular la lámina de agua aprovechable se puede tomar una profundidad radical de 60 cm antes de los 4 meses, que corresponde al período inicial de desarrollo, y de 80 cm para el período de rápido crecimiento (4 a 10 meses). La aplicación de los riegos suplementarios depende de la precipitación y se recomienda hacer la aplicación cuando se consuma entre el 50 y 60% del agua aprovechable.



Cuadro 1. Lámina de agua rápidamente aprovechable (LARA) de los suelos más importantes del valle del río Cauca.

Suelo	Orden	Textura	Da (g/cm³)	LARA (mm/cm)	LARA <sub>1</sub> 2-4	LARA <sub>2</sub> más de 4	Marcas del Cenirrómetro Cenirrómetro					
					meses (mm)	meses (mm)	EVc <sub>1</sub> =0.37 xLARA <sub>1</sub> (cm)	EVc <sub>2</sub> =0.16 xLARA <sub>2</sub> (cm)				
Argelia	Alfisol	FAr-Ar	1.3-1.4	0.5-0.8	50	60	19	10				
Bengala	Inceptisol	F-Ar	1.2-1.5	0.5-1.0	55	75	20	12				
Burrigá	Vertisol	Ar	1.2-1.5	0.6-0.9	45	70	17	11				
Coke	Inceptisol	FAr-Ar	1.2-1.4	0.6-1.0	55	75	20	12				
Esneda	Vertisol	Ar	1.2-1.4	0.7-1.0	50	70	19	11				
Florida	Mollisol	FAr-A	1.3-1.5	0.5-0.8	45	65	17	10				
Galpón	Vertisol	Ar-FAr	1.3-1.5	0.6-1.1	45	70	17	11				
Galponera	Vertisol	Ar	1.2-1.5	0.7-1.1	45	70	17	11				
Guadualito	Mollisol	FAr-A	1.2-1.5	0.7-1.2	55	75	20	12				
Herradura	Vertisol	Ar-FArL	1.3-1.5	0.5-0.9	50	70	19	11				
Juanchito	Entisol	Ar-FAr	1.2-1.4	0.6-1.1	50	70	19	11				
Líbano	Mollisol	F-A	1.3-1.6	0.6-1.0	55	75	20	12				
Manuelita	Mollisol	FAr-FA	1.2-1.6	0.5-1.6	55	75	20	12				
Marruecos	Inceptisol	FArA-Ar	1.2-1.4	0.5-1.1	50	70	19	11				
Nima	Mollisol	FAr-A	1.1-1.2	0.5-0.8	45	65	17	10				
Palmaseca	Alfisol	F-FAr	1.2-1.5	0.6-1.0	50	70	19	11				
Palmeras	Inceptisol	F-Ar	1.1-1.5	0.6-1.1	50	80	19	13				
Palmira	Mollisol	F-Ar	1.2-1.6	0.5-0.9	50	70	19	11				
Palmirita	Mollisol	FA-FAr	1.2-1.6	0.5-0.9	50	70	19	11				
Pradera	Inceptisol	FA-Far	1.1-1.4	0.6-1.0	50	75	19	12				
Pto. Tejada	Inceptisol	F-FAr	1.3-1.7	0.5-0.9	50	70	19	11				
Ricaurte	Inceptisol	Ar-FArL	1.2-1.5	0.6-1.0	50	75	19	12				
Río Cauca	Mollisol	FL-Ar	1.2-1.5	0.6-1.0	55	70	20	11				
Río La Paila	Mollisol	FA-Far	1.2-1.5	0.6-1.1	55	75	20	12				
Río Palo	Mollisol	FL-Ar	1.2-1.6	0.6-1.1	55	75	20	12				

EVc<sub>1</sub> y EVc<sub>2</sub>: Distancia entre el orificio y las marcas de control de riego

# II. Sistema Planta - Agua

# Absorción de agua

El sistema radical de las plantas no solamente sirve como medio de anclaje de la planta en el suelo, sino también como un medio eficaz para la absorción de nutrimentos 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 a las raíces, se absorbe tan rápidamente que se agota. En este 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 milímetros 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<sub>2</sub>) con 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<sub>2</sub>; 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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> entre primero en solución. El tejido interno de la hoja o empalizada está formado por las células esponjosas del mesófilo, en 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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> se necesita que los estomas estén completamente abiertos pero este hecho permite, al mismo tiempo, una mayor pérdida de agua por transpiracion. 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 del mundo, 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 en donde el verano es intenso y, por consiguiente, la demanda evaporativa de la atmósfera es mayor que en los trópicos.

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 se afecta por factores de suelo, planta y clima. Cuando el contenido de humedad del suelo es alto, las plantas pueden transpirar a su máxima capacidad; en este momento la evapotranspiración obtenida se conoce como 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, Sur Africa 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 este caso, la planta evapotranspira a una tasa inferior a la potencial, conocida como Evapotranspiración actual (Et); valor que es utilizado 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 aqua esencialmente por transpiración.

Experimentos realizados por CENICAÑA, en las condiciones ambientales del valle del 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, por ciclo de cultivo de 13 meses, oscila entre 1050 y 1300 mm.

En el valle del río Cauca se ha encontrado una relación lineal muy estrecha entre Et y Ev (Figura 2), hecho que permite calcular la Et a partir de la evaporación

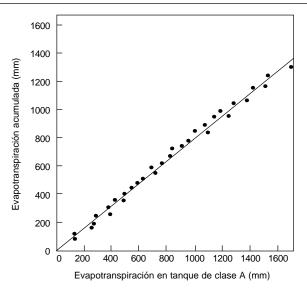


Figura 2. Relación entre la evapotranspiración de la caña y la evaporación del tanque clase A.

medida en un tanque Clase A. Una vez estimado el valor de Et, se puede fácilmente implementar la programación de los riegos por el método del balance hídrico.

#### 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 geográfico del río Cauca éstas últimas oscilan entre 800 y 2600 mm. 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. Es así como 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 la parte 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 nutrimentos son altos y por consiguiente el cultivo no se debe someter a déficit de humedad.



En el período de maduración el crecimiento de la caña se reduce 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 de los tallos 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 en evapotranspiración: K=0.3 para el período de 2 - 4 meses y 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 es muy común encontrar niveles freáticos superficiales, que pueden aportar hasta un 60% de los requerimientos de agua de la caña. A nivel de campo, se ha comprobado la posibilidad de 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, han indicado que se puede reducir el valor de K para el período de rápido crecimiento de 0.7 a 0.5, para incluir el aporte de agua capilar a partir del nivel freático.

La curva de consumo de agua de una planta es continua y va creciendo con la edad de la caña hasta llegar a valores altos en el período de rápido crecimiento, para luego decrecer durante el período de maduración. Actualmente, los riegos se han venido 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 está investigando para la definición de la curva continua de K de las variedades comerciales y de esta manera lograr una mayor precisión en la estimación de los requerimientos de riego.

Los riegos de la caña en el valle del 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 que tradicionalmente son húmedos, condición que exige la programación de los riegos por balance hídrico como una garantía para contrarrestar aquellos períodos secos que pueden afectar la producción y rentabilidad del cultivo.

# III. 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. Ultimamente, algunos ingenios de la parte norte del valle, en donde los acuíferos no son tan ricos como los de la parte 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/seg 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 promedia entre 50 y 100 m y en la actualidad está sobre-explotada, obligando 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 recientemente.

En la actualidad, la región cuenta con un total de 1980 pozos: 1337 para uso agrícola, 271 para uso industrial y 372 para uso urbano. La capacidad total de extracción de agua subterránea es de 116 m³/seg, 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/seg a valores actuales entre 70 y 80 l/seg, 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 extraido 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 las regiones semiáridas el riego es indispensable para asegurar el buen desarrollo y la producción de un cultivo; mientras que en las zonas húmedas, el riego es usado para suplir los déficits de humedad que puedan ocurrir en los períodos secos. El riego es una operación costosa que requiere de 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. El



riego por aspersión puede alcanzar eficiencias de aplicación entre 80 y 85%, requiriendo una alta inversión inicial de capital en los sistemas de distribución y aplicación, más el costo de la mano de obra y mantenimiento de los equipos. De otra parte, el riego por superficie requiere un menor costo de instalación; la eficiencia de aplicación de éste sistema en la región varía entre 30 y 50%.

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 extraida 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 en tierra que tienen capacidad entre 300 y 1200 l/seg.

En la parte más alta de los campos se dispone de acequias regadoras en donde se instalan las motobombas para los equipos de riego por aspersión. El agua para riego por gravedad se entrega a los surcos por medio de cortes o boquetes abiertos en las paredes del canal; también, mediante el uso de sifones o tubos cortos se entrega 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/seg. 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/seg, usando sifones de 5 a 10 cm de diámetro.

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/hora) es necesario considerar surcos cortos con caudales de 4 a 6 l/seg por surco y así reducir las pérdidas de agua por percolación. En campos con velocidades de infiltración media a baja (10 a 30 mm/hora) el caudal aplicado por surco debe ser menor (2 a 4 l/seg) y los surcos serán 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/hora, siendo 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 percolación profunda, sacrificando en parte la uniformidad de la aplicación del agua. El impacto de las bajas eficiencias de aplicación 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 por la baja uniformidad de distribución del agua a lo largo del surco.

En general, la eficiencia de aplicación del riego por surcos es del 50% ó menos. Una buena estrategia probada experimental y comercialmente en el valle del río Cauca, es el riego por surcos alternos; sin reducir la producción de caña y azúcar, se aumentó la eficiencia de aplicación del agua entre 30 y 50% y la del regador de 1.2 a 2.5 ha en

12 horas de trabajo. En el **Cuadro 2** se muestran las mediciones de los volúmenes de agua aplicados durante tres eventos de riego (plantilla y dos socas) en un Inceptisol. Durante el primer riego no se encontraron diferencias entre el volumen de agua aplicado por surco continuo y por surcos alternos. A partir del segundo y tercer riego se observaron economías, al aplicar 10% y 46% menos agua.

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 surcos alternos. El manejo de los caudales para regar por surcos alternos es similar al usado en el riego por surcos continuos. 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/seg por surco.

El riego por surcos alternos exige la realización del aporque como condición necesaria para garantizar una buena distribución del agua a lo largo el surco, y para impedir que el agua de los surcos con riego se pase a los surcos sin riego. Para el aporque se recomienda una altura entre 15 y 25 centímetros y entresurcos bien conformados que faciliten el manejo y avance del agua.

En los últimos años se han venido usando con mucho éxito las mangueras politubulares para reemplazar las acequias de riego, con consecuentes reducciones de las pérdidas de agua por conducción, 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 drenaje para facilitar el desplazamiento de las cosechadoras y del equipo de transporte de caña.

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. Su principal objetivo consiste en proporcionar un nivel de humedad óptimo y constante para garantizar el desarrollo óptimo del cultivo. El riego por goteo de la caña de azúcar es una tecnología ampliamente probada en Hawai, Australia, Sur Africa y Mauricio. Las ventajas obtenidas al regar por goteo son muchas, como por ejemplo: requerimientos de baja presión, ahorro de energía, bajos caudales requeridos, alta eficiencia de aplicación (>90%), ahorro de mano de obra y de agua, fertilización conjunta con el riego y reducción de la presencia de malezas; además permite el cultivo de suelos marginales de baja fertilidad y baja capacidad de retención de agua.

Cuadro 2. Reducción en el consumo de agua (%) al utilizar riego por surcos alternos en un Inceptisol.

Riego Nº	Plantilla	1ª soca	2ª soca
1	+1	-41	-31
2	-10	-37	-48
3	-46	-33	-

Nota: Valores comparativos con surco continuo



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 (US\$2.000 a 3.000 por hectárea).

El riego por goteo de la caña se inició en Hawai en 1979, en donde actualmente cubre casi el 100% del área cultivada, y se está volviendo popular en aquellas regiones con disponibilidad de agua y mano de obra bajas. Sin embargo, es recomendable evaluar la viabilidad del sistema con instalaciones piloto en áreas pequeñas antes de realizar instalaciones de tamaño comercial. En condiciones de suelos pesados, 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 aqua

El agua es un recurso costoso y en ocasiones los agricultores no disponen de la cantidad suficiente para atender sus necesidades de riego. Un programa adecuado de administración del agua a nivel regional o de hacienda, requiere de estructuras de medición a lo largo de los canales de distribución que permitan regular las asignaciones de agua a los diferentes campos; como también, el reconocimiento de las necesidades de revestimiento de los canales para evitar pérdidas de agua por filtraciones.

Generalmente, se tienen estructuras de aforo en los sitios de captación de las aguas superficiales o a la salida de los pozos profundos. En la mayoría de los casos, son pocas las estructuras de medición construidas en la red de distribución y el agua entregada a los campos se estima visualmente; lo cual genera pérdidas excesivas de agua por percolación y escorrentía al final de los surcos.

Una de las formas de afrontar los períodos de sequía, consiste en mejorar 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 que bien podría denominarse con el nombre de vertedero o aforador de cresta ancha (Figura 3). El aforador RCB 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 garganta larga, al cual se le coloca una rampa en la entrada para reducir el área de flujo y así provocar un resalto en la sección de control. La rampa se coloca en el fondo del canal, donde se debe definir: la altura de la cresta (S), la longitud de la rampa (Lb) y la longitud de la cresta (Lc) que debe tener una pendiente de 3:1. La definición de 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. Es recomendable colocar una regla de aforo a una distancia

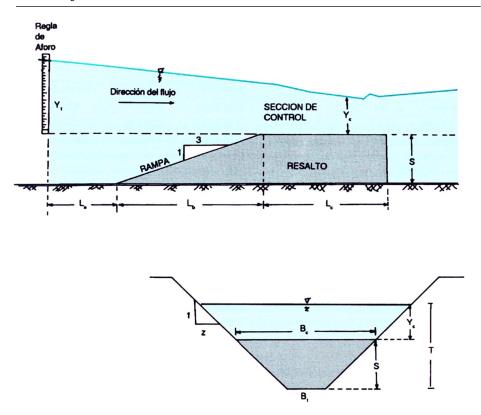


Figura 3. Descripción gráfica del aforador RBC, para canales trapeziodales.

equivalente a tres veces el tirante máximo medido sobre la cresta de la estructura. Así mismo, la longitud de la rampa **(Lb)** debe ser igual a tres veces la altura de la cresta **(S)**, y la longitud de la cresta **(Lc)** corresponde a 1.5 veces el valor del 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 computador 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.



Secciones de canales trapezoidales más comunes.													
TALUD Z:1	Altura rampa (S)	Plantilla (B <sub>1</sub> ) (m)	Tirante (T) (m)	Caudal (l/s)									
2:1	0.05	0.05-0.10	0.15	Menos de 10									
1:1	0.20-0.25	0.40-0.80	0.40-1.00	100-300									
1.5:1	0.25-0.35	0.60-0.80	0.50-1.00	300-600									
2:1	0.35-0.50	1.00-3.00	1.00-3.00	Más de 600									
	TALUD Z:1 2:1 1:1 1.5:1	TALUD Altura Z:1 rampa (S)  2:1 0.05 1:1 0.20-0.25 1.5:1 0.25-0.35	TALUD Altura Plantilla (B <sub>1</sub> ) Z:1 rampa (S) (m)  2:1 0.05 0.05-0.10 1:1 0.20-0.25 0.40-0.80 1.5:1 0.25-0.35 0.60-0.80	TALUD Altura rampa (S) (m) Tirante (T) (m)  2:1 0.05 0.05-0.10 0.15  1:1 0.20-0.25 0.40-0.80 0.40-1.00  1.5:1 0.25-0.35 0.60-0.80 0.50-1.00									

# IV. 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 de 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, conllevando a una posición de indiferencia del agricultor con respecto a la necesidad de programar los riegos adecuadamente. La programación de los riegos está dirigida a dar respuesta a dos de las preguntas que afrontan los regadores en el campo: "cuándo regar" y "cuánto aplicar".

Para determinar el momento oportuno para la aplicación de los riegos se puede tomar la misma planta 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, sonda de neutrones. Actualmente se han desarrollado nuevos equipos como el TDR (Time Domain Reflectometer), FDM (Frequency Domain Meter) 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 (Et) de la caña y ha sido usada con éxito en Hawai, Sur Africa, 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 de 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 HIDRICO

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). A nivel de 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 que se pierde por evaporación desde la superficie del suelo (Ev), pérdidas por percolación profunda (Pp) y pérdidas por escorrentía (Pe) (Figura 4).

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

CHS = GANANCIAS - PÉRDIDAS

CHS = 
$$(P + R + NF) - (Ev + Tr + Pp + Pe)$$
 (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 (1), así:

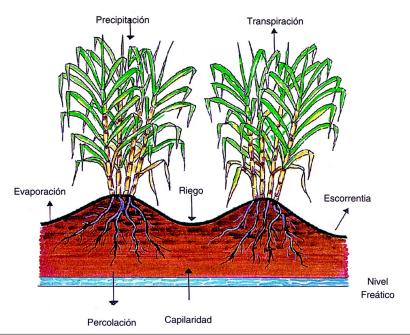


Figura 4. Representación esquemática de los componentes del balance hídrico.

CHS = 
$$(P + R + NF) - (Et + Pp + Pe)$$
 (2)

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

$$CHS = P + R - Et$$
 (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 para un período determinado se puede estimar a partir del contenido de humedad inicial (LAS<sub>i</sub>) y del contenido de humedad final (LAS<sub>i</sub>), expresados ambos como láminas de agua en milímetros, así:

$$CHS = LAS_{i} - LAS_{i}$$
 (4)



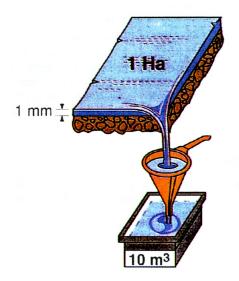


Figura 5. Representación esquemática del concepto de lámina de agua. (Adaptado de Irrigation de la Canne a Sucre, CIRAD/CA-SAPHIR-SUAD).



Reemplazando en la ecuación (3), se obtiene:

$$LAS_{t} = LAS_{t} + \sum_{t=1}^{n} (P + R - Et)_{t}$$
 (5)

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 existe la capacidad humana y el recurso hídrico suficientes para regar simultáneamente todos los campos que de acuerdo con el balance hídrico deben ser regados. CENICAÑA desarrolló un programa de balance hídrico por computador que está disponible para todos los ingenios y cultivadores, en el cual se han establecido varias prioridades de riego basadas en resultados experimentales, así:

- **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.

El método de programación de los riegos por balance hídrico ofrece ventajas en cuanto al costo del equipo y a la mano de obra requerida para su ejecución. Desde luego, se necesita personal calificado que comprenda las relaciones suelo-agua-planta-atmósfera, para que esté en capacidad de 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 de tiempo, siendo preferible adelantarlo a nivel diario. La ecuación (5) se puede generalizar de la siguiente manera para cálculos del balance diario:

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

El subíndice (t) corresponde al día de interés y (t-1) hace referencia a los valores de las variables registrados el día anterior, así: por ejemplo, para calcular la porción de 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):

$$LAS_2 = LAS_1 + (P + R - Et)_1 \tag{7}$$

Los cálculos del balance de humedad en el suelo se repiten hasta cuando la  $LAS_2$  se aproxime a cero y, en ese momento, se tomará la decisión de regar. En el **Cuadro 4**, a manera de ilustración, se presentan los cálculos del balance hídrico a nivel 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:

$$LAS_{(t+7)} = LAS_{(t)} + \sum_{t=n}^{n+6} (P + R - Et)_{t}$$
(8)

#### PROGRAMACION CON POZOS DE OBSERVACION

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

NF = CHS - 
$$\sum_{t=1}^{n} (P + R - Et)_{t}$$
 (9)

La posición del nivel freático depende de los parámetros locales que determinan el balance hídrico; por lo 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 la posición del nivel freático.

El nivel freático en el valle del río Cauca muestra una dependencia directa de la precipitación. En el ejemplo de la **Figura 6**, se aplicaron 4 riegos durante el período final de la etapa de rápido crecimiento, con una frecuencia de 25 a 30 días. Durante este período de 7 a 10 meses de edad del cultivo, el nivel freático declinó constantemente hasta llegar a una profundidad mayor a 1.20 m, considerada como posición crítica porque a partir de esta profundidad el aporte de agua freática es mínimo. En consecuencia, cuando el nivel freático se mantiene a profundidades mayores que

Cuadro 4. Ejemplo de cálculo del balance hídrico diario.

			_					1																									
		٥																															
Balance hí		EX.																															
		~																											61.0				
	Año:	۵	0	0	0	0	_	0	2	0	0	0	0	2	6	0	0	2	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		Ħ	2.0	3.0	1.7	2.4	1.5	3.2	2.3	1.5	2.7	3.9	5.6	3.1	3.9	3.1	5.9	2.1	3.0	4.0	4.0	3.7	3.2	3.7	3.6	3.2	4.0	3.2	3.2	2.7	2.4	2.7	
	Mes:	EV.	2.9	4.3	2.4	3.4	2.1	4.6	3.3	2.1	3.8	5.6	3.7	4.4	5.5	4.4	4.1	3.0	4.3	2.2	2.5	5.3	4.5	5.3	5.2	4.6	2.2	4.6	4.5	3.8	3.4	3.9	
		LAS	50.5	48.5	45.5	43.8	41.4	40.9	37.7	37.4	35.9	33.2	29.3	26.7	25.6	30.7	27.6	24.7	24.6	21.6	17.6	13.6	20.9	17.7	14.0	10.4	7.2	3.2	0.0	61.0	58.3	6.53	
		Día	-	2	က	4	2	9	7	8	6	9	£	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	23	23	24	22	56	27	88	83	೫	34
		۵	Ì					İ			İ																						
																			4.	3.4			4.9	τ.	6.								
		Ě																	11.4	က်			4	6.1	38.3								
		2																															
Balance hídrico	Año:	۵	0	0	0	0	0	7	9	0	0	0	3	0	0	0	0	2	4	9	2	0	11	10	41	0	0	2	2	2	0	0	0
Baland		E.	3.2	2.3	3.7	2.4	2.9	3.2	2.6	3.6	4.1	3.6	3.0	2.2	3.4	3.6	2.2	1.5	3.1	2.6	2.8	2.6	2.7	3.9	2.7	2.8	2.8	2.6	2.7	1.9	2.9	3.4	3.4
	Mes:	EV.	4.6	3.3	5.3	3.4	4.2	4.6	3.7	5.1	5.9	5.1	4.3	3.2	4.8	5.1	3.1	2.2	4.4	3.7	4.0	3.7	3.9	9.9	3.9	4.0	4.0	3.7	3.8	2.7	4.2	4.9	4.9
		LAS	61.0	57.8	52.5	51.8	49.4	46.5	50.3	53.7	50.1	46.0	42.4	42.4	40.2	36.8	33.2	31.0	31.5	61.0	61.0	60.2	57.6	61.0	61.0	61.0	58.2	55.4	54.8	57.1	60.2	57.3	53.9
		Día	-	2	က	4	2	9	7	8	<b>о</b>	9	£	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	23	23	54	22	26	27	78	53	8	34
					INGENIO:			HACIENDA:			SUERTE:			AREA:			S. SUELO:			VARIEDAD:			EDAD:			쏲			LARA:				

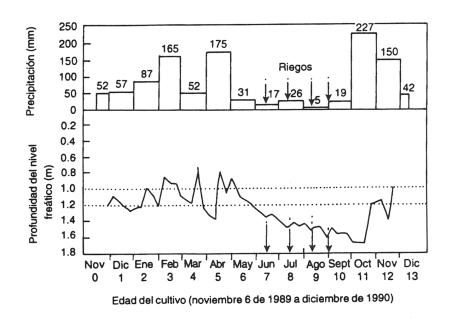


Figura 6. Comportamiento del nivel freático durante el desarrollo del cultivo.

1.2 m durante 25 días o más y en este 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 3 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 observación se puede construir colocando tres pozos de observación 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.

#### PROGRAMACION CON EL CENIRROMETRO

El balance de humedad en el suelo es un proceso hídrico que opera a nivel natural 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 aqua disponible y anticipar la fecha de riego.

El tanque Cenirrómetro desarrollado por CENICAÑA, considera el suelo como un reservorio de agua para las plantas y 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. Retomando la ecuación simplificada del balance hídrico, tenemos:



$$LAS_{f} = LAS_{i} + \sum_{t=1}^{n} (P + R - Et)_{t}$$
 (10)

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 después del riego, es igual a LARA. Este mismo fenómeno puede ocurrir después de una lluvia fuerte.

$$LAS_{i} = LARA \tag{11}$$

LAS<sub>t</sub> = LARA + 
$$\sum_{i=1}^{n} (P + R - Et)_{i}$$
 (12)

Después de transcurrido un tiempo, la LARA disponible en el suelo se va agotando; por consiguiente, el valor de LAS, determinado por la ecuación (12) del balance se acerca a cero, siendo necesario regar:

$$0 = LARA + \sum_{t=1}^{n} (P + R - Et)_{t}$$
 (13)

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

Al despejar LARA de la ecuación (13) se obtiene la ecuación (14), donde se puede visualizar que solamente se aplicarán riegos cuando se haya consumido toda

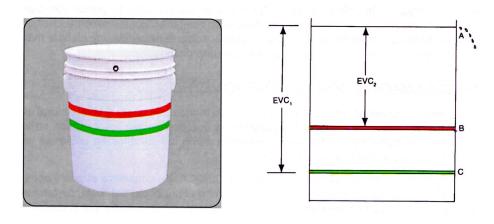


Figura 7. Tanque Cenirrómetro.

el agua rápidamente aprovechable (LARA); desde luego R=0. Esto indica que cuando la suma acumulada de los valores diarios de evapotranspiración menos la precipitación se acercan al valor numérico de LARA, en ese momento, el suelo está muy seco y es necesario aplicar riego.

$$LARA = \sum_{t=1}^{n} (Et - P)_{t}$$
 (14)

La evaporación registrada en el Cenirrómetro 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 Cenirrómetro se involucra la edad del cultivo con el valor de K, para convertir la evaporación en evapotranspiración actual (Et), 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 Cenirrómetro tiene definida la máxima capacidad de almacenamiento de agua rápidamente aprovechable (LARA) por medio de un orificio por donde 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 4.0 meses y la marca superior al control durante el período de 4 a 10 meses.

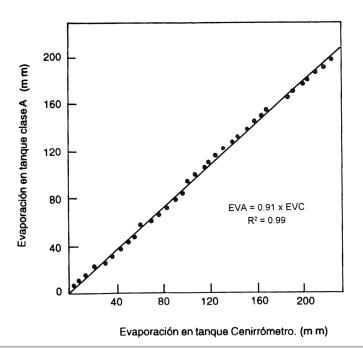


Figura 8. Relación entre la evaporación acumulada del tanque clase A y el tanque Cenirrómetro.



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

$$EVA = C \times EVC \tag{15}$$

$$Et = EVA \times K \tag{16}$$

$$Et = (C \times EVC) \times K \tag{17}$$

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 es equivalente a la LARA disponible en el suelo (LARA =  $\Sigma$ Et). Ahora se tiene:

$$LARA = EVC \times C \times K \tag{18}$$

$$EVC = \frac{LARA}{C \times k} = \frac{LARA}{0.91 \times K}$$
 (19)

Reemplazada la ecuación (19) en la ecuación (14), se obtiene la ecuación general del balance hídrico en el tanque Cenirrómetro, así:

$$EVC = \frac{LARA}{0.91 \times K} = \frac{\sum_{t=1}^{n} (Et - P)_{t}}{0.91 \times K}$$
 (20)

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)

$$EVC_{1} = \frac{LARA_{1}}{0.91 \times 0.3} = 3.7 \times LARA_{1}$$
 (21)

# Período de 4 a 10 meses (rápido crecimiento)

$$EVEC_{2} = \frac{LARA_{2}}{0.91 \times 0.7} = 1.6 \times LARA_{2}$$
 (22)

A partir de las ecuaciones (21) y (22) 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** se presentan algunos valores para las marcas EVC<sub>1</sub> y EVC<sub>2</sub> para varios suelos representativos del valle geográfico 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.

Las bondades del Cenirrómetro como un programador de riegos han sido probadas ampliamente a nivel 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 a pequeñas diferencias en los valores de LARA obtenidos para los diferentes suelos. Este hecho nos ha permitido sugerir unos valores de referencia para las marcas del Cenirrómetro, en función de la textura del suelo **(Figura 9)**. La programación de los riegos 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 directamente en el campo (Apéndice).

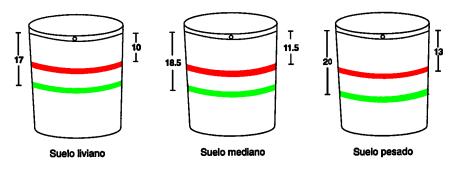


Figura 9. Valores sugeridos para marcar el CENIRROMETRO de acuerdo con el tipo de suelo.

# Ejemplo de cálculo del balance hídrico

#### Balance hídrico diario

En el **Cuadro 4** 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, cuando la edad de



la caña corresponde 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 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 01 (VIERNES), t=1

Para iniciar el balance el día mayo 01, se tienen los siguientes registros (Cuadro 4):

$$P_{1} = 0 \text{ mm}, R_{1} = 0 \text{ mm}$$

#### MAYO 02 (SABADO), 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 03 (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 prosigue 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, es necesario recordar que la capacidad máxima de almacenamiento de humedad rápidamente aprovechable en este suelo, es equivalente a LARA = 61 mm. Por lo tanto, cuando el valor obtenido para 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 mm y el agua en el suelo para el día 19 de mayo, será LAS $_{19}$  = 61 mm.

#### MAYO 19 (MARTES), t=19

Los cálculos diarios del balance se continúan hasta cuando LAS se aproxima a cero y en ese momento se debe tomar la decisión de regar para reponer una lámina de 61 mm. En el ejemplo del **Cuadro 4**, LAS=0 ocurre el 27 de junio.

El balance hídrico se debe usar como una herramienta práctica que permita 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 de 31.4 mm/7 días = 4.5 mm/día. La evapotranspiración promedia es Et=  $3.7 \times 0.7 = 3.2 \text{ mm/día}$ . La LAS $_{19} = 17.6 \text{ mm}$ , sería consumida en t=  $17.6 \text{ mm} \div 3.2 \text{ mm/día} = 6 días$ ; es decir, que el riego se debería aplicar el miércoles 24 de junio, si no ocurren lluvias que ameriten posponer la fecha de riego. Para este ejemplo, el riego se aplazó en 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. Inmediatamente el balance entra 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 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 un computador 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 a nivel experimental con el balance hídrico diario y se obtuvo mucha similitud en las fechas de riego obtenidas con los dos sistemas; lo cual resultó en la aplicación del mismo número de riegos.



#### PERÍODO: MAYO 01 A MAYO 08

La lámina de agua rápidamente aprovechable disponible en el suelo en la mañana de mayo 01 es de LAS $_1$  = 61 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)<sub>t</sub>  
LAS<sub>2</sub> = LAS<sub>1</sub> -  $\sum_{t=1}^{7}$  Et - P - R)<sub>t</sub>  
LAS<sub>8</sub> = 61 - (20.4 - 13 - 0) = 61 - 20.4 + 13 = 53.6 mm

#### PERÍODO: MAYO 08 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,

$$\Sigma$$
Et = 33.5 x 0.7 = 23.5 mm,  $\Sigma$ P = 3 mm,  $\Sigma$ R = 0 mm, LAS<sub>8</sub> = 53.6 mm. LAS<sub>15</sub> = 53.6 - (23.5 - 3 - 0) = 33.1 mm

#### PERÍODO: MAYO 15 A MAYO 22

LAS<sub>22</sub> = LAS<sub>15</sub> - 
$$\sum_{t=15}^{21} (Et - P - R)_t$$
  
LAS<sub>22</sub> = 33.1 - (17.5 - 65 - 0) = 80.6 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 mm.

#### PERÍODO: MAYO 22 A MAYO 29

 $LAS_{29} = 61 \text{ mm}$  con un exceso de 43.6 mm

Al comparar los valores de 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 uso de este sistema.

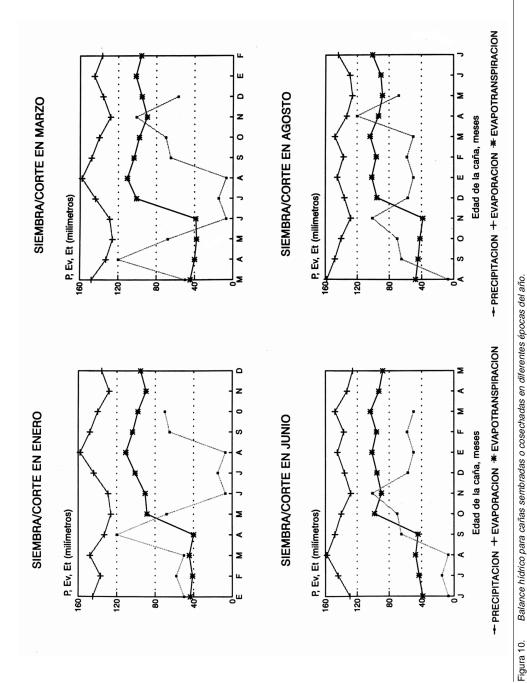
# V. Requerimientos de Riego de acuerdo con la Epoca de Siembra o de Cosecha

Los requerimientos de riego de la caña de azúcar dependen de las fechas de siembra o de cosecha; prácticas que 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 de la germinación 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 germinación 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 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 cantidad de déficit de agua esperados 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 un valor 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 rápido crecimiento coincidió con meses relativamente húmedos. En zonas con problemas de disponibilidad de agua para el riego, la siembra y cosecha de la caña se debe ajustar en lo posible a la distribución de las lluvias para disminuir la necesidad de riego.



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

# VI. Zonificación Climática por Balance Hídrico

El balance hídrico integra los diferentes parámetros del clima; hecho que permite identificar las épocas secas y húmedas, cuando se pueden presentar déficits o excesos de humedad a nivel regional. El balance entre la precipitación y la evapotranspiración actual indica claramente los períodos y la magnitud de los recursos hídricos requeridos para compensar los déficits de precipitación; de otra parte, permite visualizar la necesidad de desarrollar una infraestructura para la evacuación de excesos de humedad.

Los mapas de isobalance hídrico fueron desarrollados a partir del trabajo cooperativo entre CENICAÑA y la CVC. Se recopilaron los registros de precipitación provenientes de 140 estaciones de precipitación distribuidas a lo largo del valle del río Cauca, a los cuales se les realizó un análisis de consistencia; posteriormente, 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 no son tan abundantes en el valle del Cauca; solamente se realizan en 37 estaciones de primer orden. No todas las series tienen el mismo número de años, pretendiendo hacia el futuro disponer de un mayor cubrimiento de la zona azucarera.

Para el análisis de la serie de evaporación se compararon 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 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 unen sitios de igual valor de déficit o exceso de precipitación y delimitan áreas con intervalos de 30 milímetros. Los colores ayudan a la identificación visual de las áreas que presentan déficit o exceso de precipitación.

En general, se ha observado que las zonas norte y sur del valle del río Cauca son más húmedas, existiendo una zona central más seca (Figura 11). El mapa de isobalances para el mes de abril, que se caracteriza por ser el más lluvioso del año,



define claramente una zona central que va paralela al río Cauca, entre Palmira y La Victoria. Durante este mes, se puede presentar un déficit ligero de precipitación entre 0 y 30 milímetros.

El estudio de la precipitación usando una probabilidad del 75% indica que en 7.5 años, en un ciclo de 10, los déficits pueden ser menores; debido a que los valores de precipitación real pueden ser mayores a los usados en el presente estudio. Las curvas de isobalance para abril se orientan paralelamente al piedemonte de las cordilleras Central y Occidental. En la parte sur, donde el valle es más amplio, las curvas cambian su dirección en 90°, conformando unas áreas de exceso de humedad que aumentan hacia el sur y se observan perpendiculares a las cordilleras. Este mapa de isobalances indica que en las zonas sur y norte del valle, se deben implementar buenos sistemas para la evacuación de excesos de aguas superficiales. Las necesidades de riego en abril son prácticamente nulas, por ser un mes con precipitación superior a 100 milímetros.

El plano de isobalances para el mes de agosto (Figura 12), muestra un déficit de humedad generalizado debido a que corresponde a uno de los meses más secos del año. Se define bastante bien la zona más seca del valle, con déficit de precipitación superior a 90 milímetros, que abarca las poblaciones San Marcos, Caucaseco, Palmaseca, Candelaria, La Herradura y Rozo. Existe una zona bastante grande con déficit de precipitación entre 60 y 90 milímetros, que se extiende a lo largo del valle desde Santander de Quilichao hasta La Victoria.

En el piedemonte de la cordillera Central se encuentra una zona con déficit de precipitación entre 30 y 60 milímetros, el cual es muy pequeño, de manera que al adelantar la programación de los riegos por balance hídrico es muy posible que no exija la aplicación de riego.

El plano con las curvas de isobalance anual para el valle del río Cauca (Figura 13), presenta seis áreas diferenciadas por intervalos de excesos o déficits de 200 milímetros. La parte más húmeda corresponde al sur del valle, en donde se presentan excesos de humedad a partir de la curva de isobalance que une las poblaciones de Miranda, Corinto y Jamundí. La mayor parte del valle se encuentra entre las iso-líneas con déficit de 200 a 400 milímetros anuales. Se diferencia claramente la zona del aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón (Palmaseca) y una pequeña área de características similares en el norte del departamento del Valle, donde el déficit anual de precipitación es superior a 600 milímetros. Con la definición de estas áreas de requerimientos similares de agua se podrá lograr una mejor ubicación de las variedades de caña, diferenciando su manejo y requerimientos hídricos.

El balance hídrico regional, plasmado como curvas de isobalance, permite reconocer las áreas en donde el recurso hídrico debe manejarse con prioridad para el desarrollo de canales de distribución de aguas o para la asignación de derechos para la explotación del agua subterránea. De esta forma, los mapas de isobalance hídrico son una herramienta importante para la planeación y manejo de los recursos hídricos de una región.

CENICAÑA y los ingenios azucareros disponen de 20 estaciones meteorológicas de registro automático y en el transcurso del próximo año, este número se aumentará a 28. Con la ayuda de la red automática se podrá mejorar la aproximación de los mapas de isobalance.

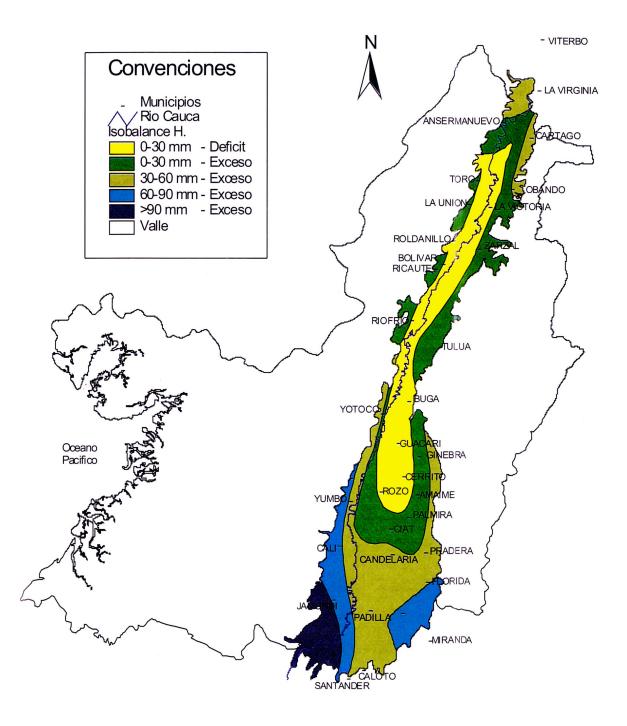


Figura 11. Curvas de isobalance hídrico en el Valle del Cauca, para el mes de Abril.

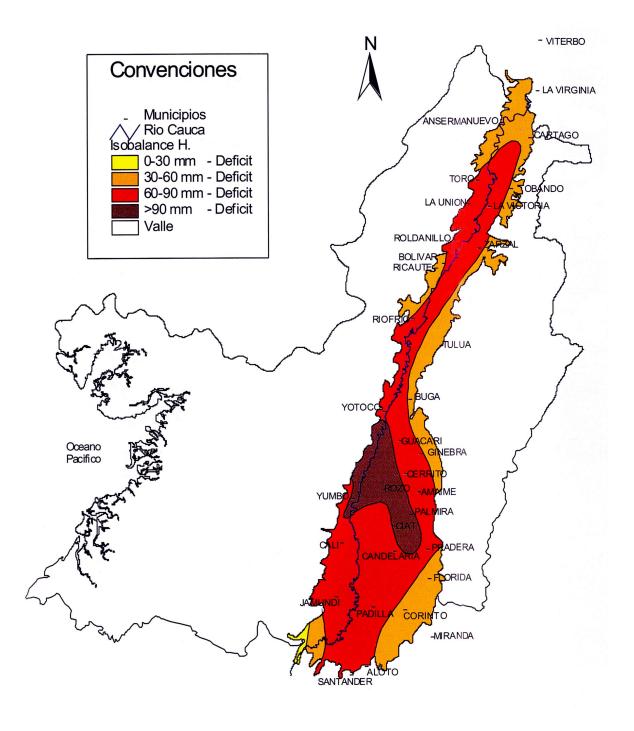


Figura 12. Curvas de isobalance hídrico en el Valle del Cauca, para el mes de agosto.

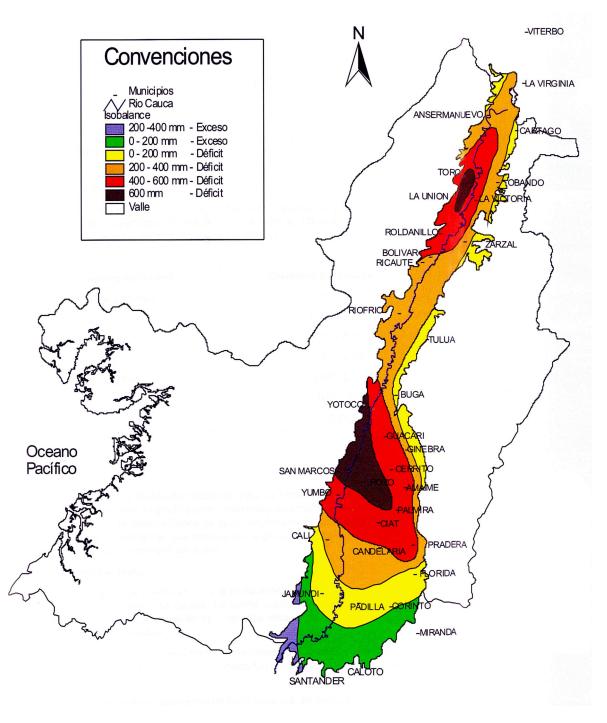


Figura 13. Curvas de isobalance hídrico anual, en el valle del río Cauca.

# VII. Apéndice

# Propiedades físicas

## 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 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 suelo 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 disgregarse.

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 consistencia del suelo.

#### Textura - análisis mecánico:

El análisis mecánico permite conocer la proporción porcentual de las 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 Agricultura de los Estados Unidos (Figura 1). Las líneas de separación 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 eliminar los términos: pesado, liviano, fino y grueso, para hacer referencia a la textura del suelo.

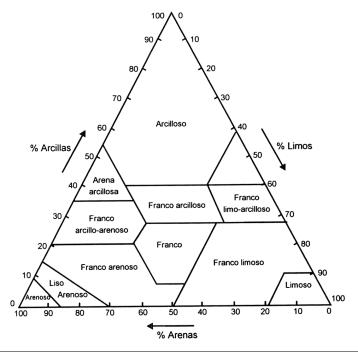


Figura 1. Diagrama para la determinación del nombre textural a partir del análisis mecánico del suelo.

#### 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 similar. 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: distribución del espacio poroso, estabilidad al agua y dureza de los agregados.

El arreglo estructural de los agregados tiene un gran efecto sobre el movimiento de aire y agua en el suelo, resistencia mecánica y temperatura del suelo. Varias propiedades físicas son tomadas para medir la manifestación de la estructura sobre la permeabilidad al aire, velocidad de infiltración, densidad aparente, porosidad aérea y módulo de ruptura. En la **Figura 2** se presenta una descripción esquemática de los tipos de estructura normalmente encontrados en los suelos minerales.

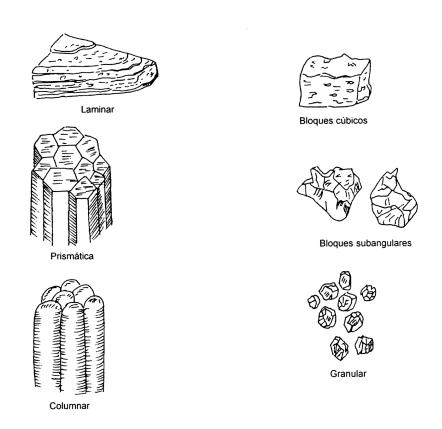


Figura 2. Arreglos estructurales más comunes de los suelos minerales.



## 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.

Densidad aparante (Da) = 
$$\frac{\text{masa s\'olidos (gramos)}}{\text{volumen total (cm}^3)}$$
 (1)

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

En el campo se pueden recolectar muestras de suelo, usando cilindros de volumen conocido, que se someten al 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.

$$W = \frac{\text{masa de agua}}{\text{masa suelo seco}} \times 100$$
 (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 gramos (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 retenida por un suelo se expresa por unidad de volumen se obtiene el contenido volumétrico de humedad.

$$\theta = \frac{\text{volumen de agua}}{\text{volumen de suelo}} \times 100$$
 (3)

Para obtener la humedad volumétrica se recomienda utilizar las mismas muestras obtenidas 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 x Densidad aparente (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 1 y 2 días después del riego. La capacidad de campo se afecta por cambios en la textura y 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 último.

El método de campo consiste en construir una piscina pequeña cuadrada (1m x 1m), 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 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 litros/m²) se cubre la piscina con un plástico oscuro o con costales de 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 una estufa, para obtener así el contenido gravimétrico de humedad a capacidad de campo.

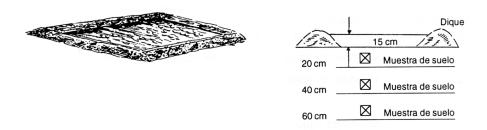


Figura 3. Esquema de la piscina y sitios de muestreo para la determinación de la capacidad de campo.



## 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, en 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 requiere de una bolsa negra de plástico con una capacidad para 3 a 4 kilogramos de suelo. Primero, se recolecta suficiente suelo de cada horizonte del perfil y se coloca en las bolsas de plástico, dejando un espacio libre en la parte superior de la bolsa. Se pueden sembrar una a dos semillas de frijol o soya, que son de fácil germinación y establecimiento. En el caso de muestras de horizontes profundos, es necesario agregar fertilizantes (NPK) para asegurar el buen desarrollo de la planta indicadora. Una vez sembradas las semillas, 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 del sellamiento de la bolsa 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 1 hectárea. De esta forma, el volumen de agua aplicada puede obtenerse al multiplicar la lámina de riego por el área regada.

$$\theta = \frac{\text{volumen de agua}}{\text{volumen de suelo}} = \frac{\text{lámina de agua x 1 hectárea}}{\text{prof. radical x 1 hectárea}}$$
(5)

$$\theta = \frac{\text{lámina de agua (mm)}}{\text{prof. radical (mm)}}$$
(6)

Lámina de agua = 
$$\theta$$
 x prof. radical (7)

$$Lámina = \frac{W \times Da}{100} \times prof. radical$$
 (8)

## Lámina de agua aprovechable (LAA)

$$LAA = \frac{(CC) - PMP}{100} \times Da \times prof. \text{ radical } \times 10$$
(9)

#### Donde:

LAA = milímetros Da = densidad aparente 
$$(g/cm^3)$$

PMP = % de humedad

## Lámina de agua rápidamente aprovechable (LARA)

$$LARA = LAA (1 - NH)$$
 (10)

En donde NH corresponde al nivel crítico de humedad

## Ejemplo de cálculo

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

Profundidad (cm)	Textura	Densidad aparente (g/cm³)	aparente de Campo		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 = 
$$\frac{(23.6 - 17.5)}{100}$$
 x 1.51 x 30 x 10 = 28 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 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.

# Sifones para riego por surcos

Los sifones son tubos cortos construidos 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 5).

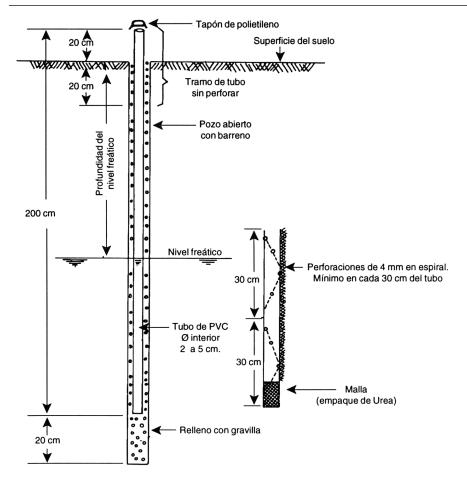


Figura 4. Pozo de observación del Nivel Freático.



Figura 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 pulgadas de diámetro construidos con tramos de tubería sanitaria de PVC con una longitud de 1.5 a 1.7 metros. En la **Figura 6**, se presentan las curvas de aforo en función de la carga de trabajo y diámetro de los sifones más usados en el valle del río Cauca para el riego de la caña de azúcar.

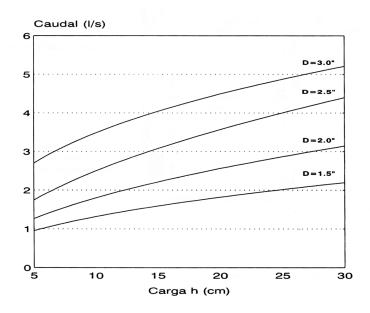


Figura 6. Curvas de aforo para sifones de P.V.C. utilizados para el riego de la caña de azúcar.

# 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 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.

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:

$$Q = \frac{CA\sqrt{2gH}}{1000}$$
 (11)

#### Donde

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

A = Area 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 que varía de acuerdo con la relación entre el diámetro del orificio y la tubería de la descarga, el cual se puede obtener del cuadro siguiente:

Relación	= Diámetro orificio  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	



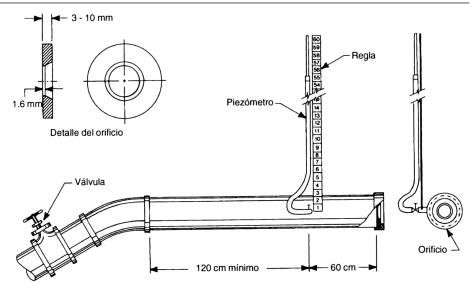


Figura 7. Orificio circular para el aforo de pozos con descarga entre 3 y 150 L/s. (Tomado de: Groundwater amd Wells, 1986, 2a. ed. Johnson Division, St. Paul, Minnesota, 1089 p.)

# Aforador RBC

A continuación se presentan las tablas de aforo para las secciones más comunes de aforadores RBC, para canales de conducción y surcos, usados en el valle del río Cauca para el riego de la caña de azúcar.

Tabla de aforo para secciones más comunes - RBC

péna	

S.III	cos	Cai	201		Canal	C	anal	
Sui		Terci			cundario		mario	
- 1	).05 m	B <sub>1</sub> = 0		1	= 0.80 m	- 1	1.20 m	
B = 0	).01 m	B = 1	.00 m	В =	= 1.70 m	B =	3.20 m	
z =	2.00	c Z =	1.00	ž	= 1.50	c Z =	= 2.00	
	).05 m	S = 0	20 m	S =	= 0.30 m	S =	0.50 m	
	).30 m	L = 1			= 1.20 m		4.00 m	
a		a		a		a		
b	).05 m	$L_{b} = 0$		b	= 0.90 m	b	1.50 m	
$L_c = 0$	).15 m	L <sub>c</sub> = 1	.70 m	L <sub>c</sub> =	: 1.70 m	L <sub>c</sub> =	5.00 m	
Н	Q	Н	Q	Н	Q	Н	Q	
(cm)	(l/s)	(cm)	(l/s)	(cm)	(l/s)	(cm)	(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 3.4	1.1 1.2	29 31	355 401	32 34	685 764	32 34	1139 1267	
3.4	1.4	35	501	3 <del>4</del> 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	2114	
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 6.6	3.8 4.0	65 67	1646 1749	64 66	2512 2668	64 66	3994 4232	
6.8	4.0	69	1855	68	2830	68	4232 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 7.7	93 05	3417	92 94	5196 5431	92 94	8021	
9.4 9.6	7.7 8.0	95 97	3573 3732	94 96	5431 5671	94 96	8368 8723	
9.8	8.4	99	3895	98	5918	98	9087	
	₩.¬	100	3979	100	6171	100	9459	

El Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia - CENICAÑA es una corporación privada y sin ánimo de lucro, fundada en 1977 por iniciativa de ASOCAÑA en representación de la agroindustria azucarera localizada en el valle geográfico 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 tiene programas de investigación en Variedades, Agronomía, Procesos de Fábrica y, Análisis Economómico y Estadístico. Servicios de apoyo en Información y Documentación, Cooperación Técnica y Transferencia de Tecnología.

El Centro Experimental está ubicado a 3° 13' latitud N de la linea ecuatorial, a una altura aproximada de 1024 m.s.n.m. La temperatura media anual en este sitio es de 23.5°C, precipitación media anual de 1160 mm y humedad relativa de 77%.

Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia. 1996.