

# DISEÑO DE RIEGO POR ASPERSION

Gabriel Selles van Sch. Ing. Agr. Dr  
Raúl Ferreyra E. Ing. Agr. M. Sc.  
Instituto de Investigaciones Agropecuarias

## Generalidades

El riego por aspersión consiste en aplicar el agua al suelo simulando una lluvia. Este efecto se consigue gracias a la presión con que fluye el agua dentro de un sistema de tuberías, la que es expulsada al exterior a través de las boquillas de un aspersor. Normalmente, la presión requerida se obtiene a partir de bombas hidráulicas las cuales aspiran el agua desde un canal, río o pozo. Sin embargo, el sistema también puede operar sin bombas cuando la fuente de agua se encuentra en una posición más elevada que el terreno a regar (sobre 40 a 50 m de diferencia de nivel, según el sistema que se trate).

Hay ciertas condiciones que favorecen el riego por aspersión dentro de las cuales se pueden señalar las siguientes

- a) Terrenos de topografía irregular, ondulados y de pendiente fuerte, en cuyo caso la conducción de agua en tuberías resuelve los problemas de acequias.
- b) Suelos poco profundos, en los cuales no pueden realizarse trabajos de nivelación y deben aplicarse reducidas láminas de agua en cada riego.
- c) Suelos que presentan alta velocidad de infiltración, en los que el uso de riego superficial puede significar importantes pérdidas de agua por percolación profunda. Al mismo tiempo en suelos de alta erodabilidad, donde el escurrimiento de agua en superficie puede producir importante transporte de partículas.

Este método de riego tiene aplicaciones adicionales, tales como la distribución de fertilizantes junto con el agua de riego (fertirrigación) y el control de heladas, siempre que el equipo se diseñe especialmente para este último fin.

El riego por aspersión también presenta inconvenientes, entre los que se encuentran:

- a) Altos costos de inversión en equipos, aún cuando en algunas situaciones el riego por aspersión resulta más económico que los que implica la nivelación de suelos para riego superficial.
- b) Altos costos de operación en aquellos equipos que requieren impulsión mecánica para dar la presión necesaria (costo de energía).
- c) Su uso se ve limitado en áreas de excesivo viento, donde este afecta la uniformidad de distribución y eficiencia en la aplicación del agua.
- d) No es posible aplicarlo en áreas donde el caudal no es continuo, a menos que se cuente con un tranque acumulador que permita asegurar continuidad de caudal entre dos turnos de entrega de agua al predio.
- e) Aguas de mala calidad, en particular aguas de alto contenido de sales.

Los sistemas de riego por aspersión se pueden clasificar en función de la movilidad de sus diferentes componentes. De esta forma se puede hablar de equipos estacionarios, que son aquellos los que permanecen en una misma posición mientras dura la operación del riego, y los de desplazamiento continuo, que se desplazan constantemente durante el período de riego. Estos últimos también se denominan máquinas de riego.

### **Sistemas de riego por aspersión estacionario.**

Los equipos de aspersión estacionarios se caracterizan por que la red de riego permanece inmóvil dentro del área regada, al menos mientras dura la operación del riego. Dentro de los equipos estacionarios se distinguen los equipos fijos, los semifijos y los portátiles.

#### Riego por aspersión con equipos estacionarios fijos:

Este sistema tiene la característica que la red de riego está constituida por tuberías que cubren simultáneamente la totalidad de la superficie a regar, aún cuando solo una parte de ella (sector) se encuentra en funcionamiento durante una operación de riego. El riego se efectúa abriendo y cerrando válvulas ubicadas en las tuberías que disponen de emisores.

La colocación de la red de tuberías en el campo puede ser permanente o temporal. En el primer caso, las tuberías están enterradas, quedando el equipo en forma permanente en una misma superficie, con una red de tuberías subterráneas. En los sistemas fijos temporales, la red de tuberías se colocan sobre la superficie del terreno después de la siembra o plantación y se retiran un poco antes de la cosecha. Estos equipos se denominan normalmente como "cobertura total" y las tuberías se unen unas a otras a través de sistemas de acople rápido, que facilitan el ensamblaje del conjunto. De esta forma el equipo de riego puede ser trasladado de lugar de una temporada a otra, de acuerdo a la rotación del cultivo que interesa regar. Un sistema de cobertura total está indicado cuando la naturaleza del suelo o del cultivo exige riegos muy frecuentes, para abaratar costos de mano de obra en traslado de material y evitar el tránsito sobre el terreno húmedo

#### Riego por aspersión con equipos semi fijos

En este tipo de equipos solo una parte de las tuberías de la red de riego permanece fija, normalmente subterránea, mientras que otra parte del sistema, las tuberías que disponen de emisores o aspersores, son trasladadas de un punto a otro del campo, para cumplir con la operación de riego. Este tipo de equipos se suele también llamar de "cobertura parcial"

#### Riego por aspersión con equipos portátiles:

En este caso todas las tuberías que constituyen la red de riego se trasladan de un punto a otro del campo a medida que se realiza la operación del riego, de tal forma que el material que se utiliza, para regar una determinada superficie es mínimo, en comparación con los dos sistemas anteriores.

Los costos de inversión de estos equipos va disminuyendo a medida que disminuyen los componentes fijos del sistema, sin embargo en contraposición va aumentando el costo de mano de obra, por concepto de traslado de las tuberías para cumplir con el ciclo de riego. El traslado de tuberías en suelos recién regados ofrece ciertas dificultades, especialmente en suelos arcillosos. Por otra parte en cultivos de baja altura el traslado puede hacerlo una persona, pero en aquellos de mayor altura, precisan de al menos dos personas

### **Sistemas de riego por aspersión con equipos de desplazamiento continuos**

Estos sistemas de desplazamiento continuo esta constituido por máquinas de riego cuyo desplazamiento se realiza en forma permanente y automática mientras riegan. Permiten mojar grandes superficies con muy poca mano de obra. Dentro de este grupo se pueden distinguir:

#### Carros autopropulsados o carretes de riego

El agua se aplica por medio de un aspersor de gran tamaño (cañón de riego) colocado sobre un carro con ruedas o patín, el cual es alimentado con agua a presión por medio de una manguera de polietileno. Esta manguera se enrolla automáticamente en un tambor accionado, por un flujo de agua a través de un mecanismo de turbina o de fuelle hidráulico (Figura 8).

#### Pivote Central

El pivote central corresponde a un brazo o lateral , equipado con aspersores, de longitud variable ( 100 a 400 m o más), que gira en torno a un punto central, donde entra el agua a presión al sistema , regando en círculos. El brazo o lateral esta suspendido sobre el campo de a regar por estructuras en "A", denominadas torres, espaciadas entre 30 a 60 m una de otra. Las torres están equipadas por ruedas propulsadas, cuya fuente de energía normalmente es electricidad o agua (hidráulica). Cada torre tiene un sistema de guías y control que permite que las torres se muevan a una velocidad tal que permita una alineación entre el centro del pivote y la última torre. Esta debe realizar el mayor recorrido y su velocidad controla la velocidad de todo el sistema (figura16)

#### Rampa de avance frontal

Corresponde a un brazo con emisores apoyado sobre torres, al igual que el pivote , pero que avanza en línea recta, pudiendo regar campos rectangulares, sin que se produzca pérdida de superficie, como sería el caso de un pivote. Equipo que viaja en línea recta y puede regar hasta el 95% de terrenos cuadrados o rectangulares. Es abastecido de agua a través de un canal que corre paralelo a la dirección de movimiento, o desde hidrantes que permiten conectar una manguera flexible de gran longitud ( más de 100 m) a una red presurizada . Muchos laterales móviles tienen grandes motores diesel conectados a generadores que energizan la bomba y motores de las torres, mientras el sistema de mangueras es presurizado por motores fuera del campo.

Estos sistemas necesitan de un sofisticado sistema de alineación y se gobiernan mediante señales de baja frecuencia emitidas por cables enterrados en el campo. Pueden cubrir franjas de hasta 900 metros de ancho y regar campos de hasta 2.500 metros de largo.

## **RIEGO POR ASPERSION ESTACIONARIO**

### **1.- Componentes de un Equipo de Riego por Aspersión estacionario**

El equipo de riego está integrado por los siguientes componentes:

#### **a) Equipo motobomba**

Este tiene por objetivo aspirar el agua desde una fuente de abastecimiento e impulsarla a través de un sistema con la presión suficiente para hacer funcionar los aspersores y compensar las pérdidas de energía en las tuberías. Las bombas utilizadas son centrífugas, pudiendo ser accionadas por motores eléctricos o por motores a combustión interna ( bencina o diesel)

Esta parte del equipo se puede omitir e cuando la fuente de agua está a una elevación tal, que permite generar la energía necesaria para hacer funcionar el equipo

#### **b)Tuberías**

Las tuberías permiten conducir el agua desde el equipo motobomba hasta los aspersores.

De acuerdo a la función que cumplen dentro de la red hidráulica se distinguen:

- Tuberías laterales, que llevan los aspersores,
- Tubería subprincipal que entrega a las laterales,
- Tubería principal, que entrega agua a la subprincipal, y
- Tuberías de conducción que lleva agua desde la fuente de abastecimiento hasta el principal.

Los tuberías pueden ser de distintos materiales, siendo los más comunes el aluminio, el fierro galvanizado, el PVC y polietileno de alta densidad. (PE)

Normalmente las tuberías que van enterradas son de PVC. Las tuberías que van en superficie son generalmente en aluminio, galvanizado o polietileno de alta densidad.

#### **c) Aspersores**

Corresponden a los dispositivos que tienen por finalidad la aplicación directa de agua al terreno.

De acuerdo a la presión de operación los aspersores se pueden clasificar en:

- i) Aspersores de baja presión, cuya presión de operación varía entre 1 a 2 atm. ( 10 a 20 m.c.a) Especial utilidad tienen en el riego de frutales, debajo de la copa. Tienen un limitado radio de influencia.
- ii) Aspersores de presión intermedia, entre 2 a 4 atm. (20 a 40 m.c.a.) Este tipo de aspersores es el más utilizado, adaptándose a todo tipo de suelo y cultivo. El diámetro de mojadura puede alcanzar entre 20 a 40 m.
- iii) Aspersores de alta presión, entre 4 y 7 atm. ( 40 a 70 m.c.a) Corresponde a aspersores gigantes, o cañones especialmente adaptados para cultivos elevados, tales como maíz, para empastadas y otros cultivos como remolacha. El diámetro del círculo de mojamiento puede variar entre 60 y 150 m.

Comercialmente se encuentra disponible una larga gama de aspersores, los que varían desde aspersores fijos de bajo gasto, hasta aspersores rotativos gigantes (cañones) que descargan sobre 60 a 80 m<sup>3</sup>/hr (17 a 22 l/s) o más .

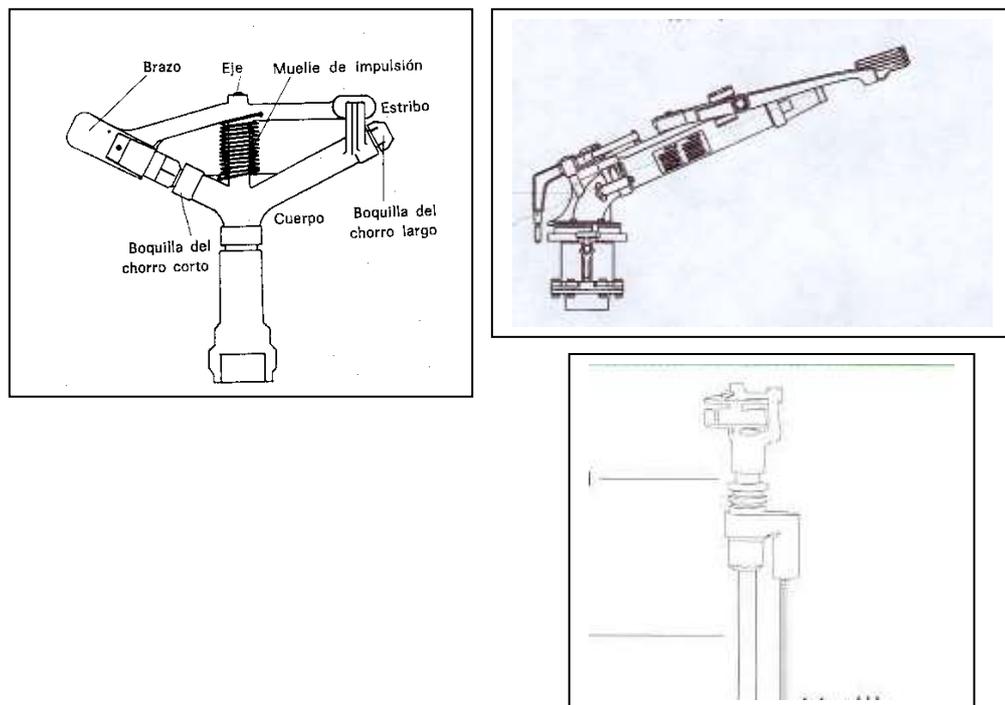


Figura 1 Distintos tipos de aspersores

Los aspersores más comunes utilizados en los equipos de tipo estacionario son los rotativos de impacto. Estos son confeccionados con una o dos boquillas, con una gran variedad de diámetros, con presiones de operación de entre 2 a 4 atm (20 a 40 m.c.a) y descargas entre 0,1 y 0,8 l/s. Normalmente no se recomienda utilizar cañones de riego en este tipo de sistemas, ya que los tiempos de riego son cortos y obligan a muchos cambios de posición durante el día

El mojamiento típico de un aspersor rotativo se presenta en la figura 2. Se puede observar que al alejarse del emisor, la cantidad de agua aplicada disminuye. Para que se produzca un humedecimiento uniforme del suelo , los aspersores se deben disponer en una posición tal que permitan el traslape de los radios de mojamiento.

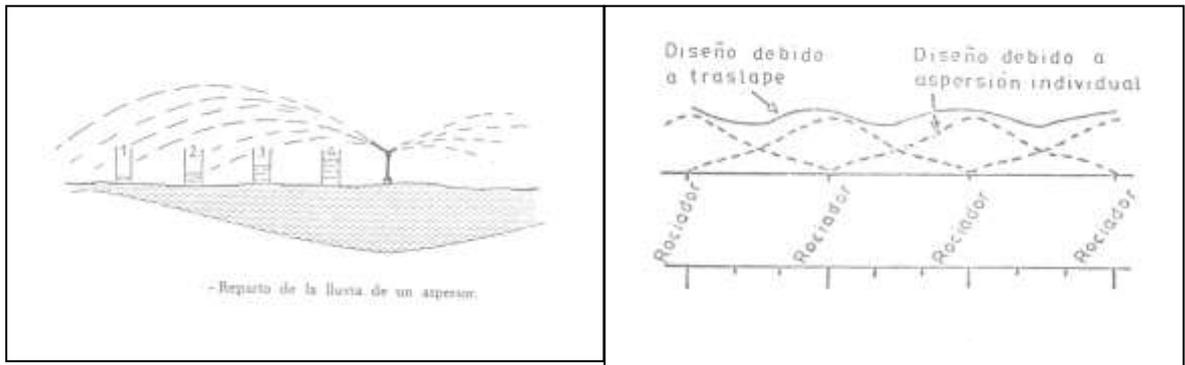


Figura 2 Patrón de mojado de un aspersor individual y el resultado producto del traslape de aspersores contiguos

### Hidráulica de los Aspersores

El gasto o caudal ( $q$ ) que entrega un aspersor en función de la presión de operación y del diámetro de la boquilla, según la siguiente relación:

$$q = C * A * [2 * g * P]^{1/2} \quad (1)$$

$q$  = en  $m^3/s$

$C$  = es el coeficiente de gasto y su valor 0,98

$A$  = es el área de circulación del agua en la boquilla, en  $m^2$ , que es función de su diámetro,  $d$ , ( $A = 0,785 * d^2$ )

$g$  = aceleración de gravedad ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ) y

$P$  = presión de operación del aspersor, en metros de columna de agua (m.c.a.).

Nota 10 m.c.a = 1 bar = 1 atm = 14,7 psi

El gasto de un aspersor en l/s se puede escribir:

$$q \text{ (l/s)} = 0,0034 * d^2 * P^{1/2} \quad (2)$$

donde  $d$  está en mm y  $P$  en mc.a.

Dado el comportamiento hidráulico de los aspersores, la relación de caudales entre aspersores se relaciona de la siguiente manera:

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{(P_1)^{1/2}}{(P_2)^{1/2}} \quad (3)$$

Así, La variación de caudales de los aspersores es función de la raíz cuadrada de la variación de presión. De esta manera, si dentro de una lateral con aspersores se produce una variación de presión del 20%, la variación de caudal de los emisores será solo del 10%

La a expresión anterior permite determinar el caudal de un aspersor, cuando se conoce el caudal de uno de ellos y la relación de presión entre ambos:

$$q_1 = q_2 * [P_1/P_2]^{1/2} \quad (4)$$

### **Accesorios**

Un equipo de riego por aspersión esta integrado por una cierta cantidad de elementos adicionales, o de accesorios, que faciliten la conducción y distribución del agua, así como también el control del sistema. Entre los más importantes se pueden señalar: conexiones (codos, tees, elevadores, etc), válvulas de apertura y cierre, válvulas de aire, válvulas reguladoras de presión, filtros, inyectoros de fertilizantes, etc.

### **2.- Diseño de riego por aspersión estacionario**

El diseño de riego por aspersión incluye dos etapas, una de diseño agronómico y otra de diseño hidráulico.

El diseño agronómico corresponde la determinación de:

- Evapotranspiración del cultivo,
- Lámina de riego neta y bruta
- Velocidad de infiltración básica,
- Frecuencia de riego y superficie mínima de riego diario
- Selección del modelo de aspersor y disposición de los mismos en el campo,
- Número de laterales funcionando simultáneamente para cumplir el programa de riego,
- Determinación de caudales requeridos.

El diseño hidráulico corresponde al cálculo de los diámetros de tuberías requeridos para que el sistema funcione cumpliendo ciertos requisitos mínimos establecidos y a la selección del equipo de bombeo, si este fuera necesario.

#### **2.1 Diseño agronómico**

El diseño agronómico implica conocer características del cultivo a regar (evapotranspiración, sensibilidad al déficit hídrico, profundidad de raíces) y el suelo en que está implantado el cultivo (textura, profundidad, retención de humedad, velocidad de infiltración básica, etc.).

### Determinación de la evapotranspiración

La evapotranspiración del cultivo se puede determinar a partir de la evaporación medida en un evaporímetro de bandeja clase A, o a partir de otros métodos confiables, como por ejemplo el de Penman-Monteith).

La evapotranspiración a considerar para fines de diseño corresponde a la del mes de máxima demanda ( $E_{tmax}$ ). El valor de ET máxima puede ser el promedio mensual diario del mes de máxima demanda o bien el promedio de los 10 días de mayor demanda en el mes de máxima demanda. Es necesario tener presente que la de la demanda es la característica determinante de la capacidad del equipo de riego

### Lámina de riego neta y bruta

La lámina de riego neta ( $L_n$ ) corresponde a la cantidad de agua necesaria para suplir el déficit de humedad del suelo (DHA), producto de la extracción de agua por parte del cultivo.

El valor de  $L_n$  se obtiene al aplicar el valor de umbral de riego (UR) al total de agua que puede retener un suelo en el rango explorado por la zona de raíces del cultivo (hr).

El valor de UR% depende del cultivo y de la evapotranspiración potencial del área de estudio. Valores de UR% para diferentes cultivos y diferentes condiciones de evapotranspiración potencial se presenta en el cuadro 1

Grupo de cultivo	Evapotranspiración potencial ( mm/día)				
	2	4	6	8	10
1	50	42	25	20	18
2	68	48	35	28	22
3	80	60	45	37	30
4	87	70	55	45	40

1).Cebollas, papas, pimiento,2) tomates, vides, porotos. 3) alfalfa, arvejas, cítricos, sandías, trigo4) olivo, sorgo, soja  
Cuadro 1. Umbral de riego (%) para diferentes grupos de cultivo, de acuerdo a la demanda evaporativa de la atmósfera

La retención de humedad de un suelo (hr) debe ser medida en terreno o estimada a partir de la textura del suelo utilizando tablas, como la que se presenta en el cuadro 2 .

<b>Textura</b>	<b>Retención(mm/m)</b>
Arenosa	80
Franco-arenosa	120
Franca	170
Franco-arcillosa	200
Arcillo-arenosa	210
Arcillosa	230

Cuadro 2. Retención de humedad del suelo (hr) según su textura, expresada en mm/m.

Para cuantificar la lámina de reposición se utiliza la siguiente relación:

$$L_n = (UR\%/100) * H_r * H * (1-P/100) \quad (5)$$

donde:

$L_n$  = Lámina de riego neta (mm)

UR% = Umbral de riego

$h_r$  = Retención de humedad mm/m

H = Profundidad de raíces de cultivo (m)

P = porcentaje de piedras del perfil de suelo

La lámina de riego bruta incluye la eficiencia de aplicación,. En los sistemas de riego por aspersión estacionarios la eficiencia de aplicación es del orden del 70 a 80%, normalmente se considera como 75%. En la eficiencia del riego por aspersión influye mucho la velocidad del viento y la magnitud de la lámina que se aplique.(cuadro 3)

Lámina de agua aplicada mm	Evapotranspiración Máxima en mm/día		
	5 mm o menos	5 - 7,5 mm	7,5 o más mm
Velocidad de viento promedio 6,4 Km/h			
25	68%	65%	62%
50	70%	68%	65%
100	75%	70%	68%
125	60%	75%	70%
Velocidad del viento promedio 6,4 - 16 Km/h			
25	65%	62%	60%
50	68%	65%	62%
100	70%	68%	65%
125	75%	70%	68%
Velocidad del viento promedio 16 - 24 Km/h			
25	62%	60%	58%
50	65%	62%	60%
100	68%	65%	62%
125	70%	68%	65%

Cuadro 3 Eficiencia de aplicación del riego por aspersión en función de velocidad de viento y lámina de riego

La lámina bruta queda definida como:

$$Lb = \frac{Ln}{Ea} \quad (5 a)$$

Donde:

Lb = Lámina bruta (mm).

Ln = Lámina neta de riego (mm).

Ea = Eficiencia de aplicación del equipo de riego (%/100).

### Velocidad de infiltración básica

La velocidad de infiltración básica, o estabilizada, corresponde al valor instantáneo de velocidad de infiltración, cuando su variación en el tiempo, entre dos períodos de medición consecutivos, no supera un 10% de su valor. La velocidad de infiltración puede ser medida en terreno o bien se puede estimar a partir de tablas, para distintas condiciones de textura de suelo

<b>Tipo de suelo</b>	<b>mm/hr</b>
Arenoso grueso	25 a 60
Arenoso fino	18 a 25
Franco arenoso	14 a 18
Franco limoso	10 a 14
Franco arcilloso	7 a 10
Arcillo limoso	4 a 7
Arcilloso compacto	2 a 5

Cuadro 4 Valores medios de Infiltración estabilizada para suelos de distintas texturas

En el caso de suelos con pendiente sobre 5%, se recomienda reducir los valores la velocidad de infiltración básica por un factor que refleje el efecto de la pendiente sobre el escurrimiento superficial de agua.

Los factores de reducción normalmente utilizados se presentan en el Cuadro 5.

<b>Pendiente (%)</b>	<b>Reducción (%)</b>
0 – 5	0
6 – 8	20
9 – 12	40
13 – 20	60
> 20	75

Cuadro 5. Factores de reducción de la velocidad de infiltración básica en función de la pendiente del terreno

### Frecuencia de riego y de la superficie mínima de riego diario

La frecuencia de riego en el mes de máxima demanda se calcula a partir de la siguiente relación:

$$Fr = \frac{Ln}{Etmax} \quad (6)$$

Fr : corresponde a la frecuencia de riego, en días, para el mes de máxima demanda

Ln= a la lámina de riego neta en mm, en mm.

Etmax = a la evapotranspiración del cultivo en el mes de máxima demanda, en mm/día.

Para regar todo el campo con la frecuencia de riego adecuada es necesario regar diariamente una determinada superficie mínima tal, que al término de un ciclo de días equivalente a la frecuencia de riego, se complete el aporte de agua a toda la superficie.

Para calcular la superficie mínima de riego diario se usa la siguiente relación:

$$SMR = \frac{ST}{Fr} \times 7/6 \quad (7)$$

SMR = superficie mínima de riego diario (ha),

ST = superficie total a regar (ha),

Fr = frecuencia de riego en el mes de máxima demanda (días),

7/6 = factor de corrección que considera el riego sólo en 6 días de los 7 de la semana. Se considera entonces un día a la semana para la mantención de equipos.

### Selección y disposición de los aspersores

La condición más importante que hay que satisfacer con la selección y disposición de los aspersores, es el logro de una buena distribución del agua (alto coeficiente de uniformidad) y una buena eficiencia de aplicación.

Estos dos aspectos están determinados por la infiltración básica, el efecto de la pendiente del terreno y la velocidad del viento.

Tomando en cuenta estos factores, la selección del aspersor se realiza en función de su presión de trabajo y del espaciamiento, utilizando para ello los catálogos de comportamiento de diferentes modelos de aspersores de los distintos fabricantes (ver ejemplo de catálogo en anexo).

El aspersor que se seleccione debe arrojar una intensidad de lluvia ligeramente inferior a la velocidad de infiltración básica del suelo de modo de evitar el escurrimiento

superficial. La intensidad de precipitación del aspersor se calcula a partir de la siguiente relación:

$$I_{pp} \text{ (mm/h)} = \frac{q_a \text{ (l/s)} * 3.600}{A \text{ (m}^2\text{)}} \quad (8)$$

Donde :

$I_{pp}$  = es la intensidad de precipitación en mm/h.

$q_a$  = es el gasto del aspersor en l/s.

$A$  = es el área de mojado de cada aspersor, dada por su espaciamiento sobre la lateral (Esl) y entre laterales (Eel), en m<sup>2</sup>.

Por otra parte, la presión de operación del mismo normalmente se selecciona con valores entre 2,5 a 3,5 atmósferas (25 a 35 m.c.a) como máximo, para no sobre cargar la bomba e incurrir en gastos innecesarios de energía, salvo que se trate de cañones de riego. En todo caso los catálogos de los fabricantes indican los rangos más adecuados de presión de funcionamiento.

Es necesario tomar en cuenta que a objeto de mantener una alta uniformidad del riego debe existir un traslape de mojado entre aspersores, por lo que el distanciamiento entre aspersores, tanto sobre la lateral (Esl) como entre laterales (Eel), será función del diámetro de mojado del aspersor y de la velocidad del viento.

En el Cuadro 6 se presentan espaciamientos recomendados, en función del diámetro de mojado, para dos tipos de disposiciones: en cuadrado u en triángulo.

Velocidad del viento (m/s)	En cuadrado	En triángulo
	Separación entre aspersores	Separación entre aspersores
Sin viento	65 % D	75 % D
2	60 % D	70 % D
3,5	50 % D	60 % D
> 3,5	30 % D	30 % D

Cuadro 6. Espaciamiento de los aspersores en función de la velocidad del viento, por disposiciones en cuadrado y triángulo ( D es el diámetro de mojado del aspersor, en m)

La disposición más utilizada de los aspersores es en cuadrado o rectángulo siendo las más comunes las de : 6 x 6, 6 x 12, 12 x 18, 12 x 12. Normalmente corresponden a múltiplos de 6 debido a que las tuberías se fabrican en una longitud. Existen también en el mercado tubería de 3 m de longitud, lo que permite realizar marcos del tipo 12 x 15, 15 x 18

Las disposiciones en triángulo presentan un mayor recubrimiento ( mayor uniformidad de riego) , pero su implantación en terreno puede presentar dificultades, en particular en equipos con laterales móviles, por lo que normalmente se prefiere la disposición en cuadrado.

El espaciamiento de los aspersores lo debe determinar a voluntad el diseñador, tomando en cuenta además de lo ya señalado, las dimensiones del terreno, el uso del menor número de unidades posibles y de las características de los aspersores en cuanto a su descarga, presión de operación y diámetro de mojamiento.

La selección del aspersor se realiza por tanteo entre varios modelos hasta encontrar el que más se adapte a las condiciones de cada situación en particular.

Un modelo tipo de aspersor, con sus características de funcionamiento se presenta en el Cuadro 7.

P (atm)	Boquilla 9/64"		Boquilla 5/32"		Boquilla 11/64"		Boquilla 3/16"		Boquilla 3/64"		Boquilla 7/32"	
	D (m)	Q (l/s)	D (m)	Q (l/s)	D (m)	Q (l/s)	D (m)	Q (l/s)	D (m)	Q (l/s)	D (m)	Q (l/s)
1.76	24.5	0.18	25.0	0.22	25.5	0.27	26.0	0.31	26.0	0.37	27.0	0.43
2.11	24.5	0.20	26.0	0.24	27.0	0.29	27.5	0.35	28.5	0.41	29.0	0.48
2.46	25.5	0.22	26.0	0.26	27.5	0.32	28.5	0.38	29.5	0.45	30.5	0.52
2.82	25.5	0.23	27.0	0.28	28.0	0.34	29.0	0.40	30.0	0.48	31.0	0.56
<b>3.17</b>	<b>25.5</b>	<b>0.24</b>	27.0	0.30	28.5	0.36	30.0	0.43	31.0	0.51	31.5	0.59
3.52	26.0	0.25	27.5	0.31	29.0	0.38	30.5	0.45	31.5	0.53	32.5	0.62
3.87	26.0	0.27	27.5	0.33	29.5	0.40	31.0	0.47	31.5	0.56	32.5	0.65
4.22	26.5	0.28	28.0	0.34	29.5	0.41	31.0	0.49	32.0	0.58	33.0	0.67

P = presión, D = diámetro de mojamiento (m) Q = descarga (l/s)

**Cuadro 7.** Aspersor de círculo completo N° 30 W. Ejemplo de catálogo

### Cálculo del tiempo en riego

Una vez seleccionado el aspersor y defina la intensidad de precipitación, se procede a calcular el tiempo de riego, para ello es necesario conocer la lámina de riego bruta (Lb) (Ln/Efa) y la intensidad de lluvia del aspersor.

$$TR = \frac{Lb}{Ipp} \quad (9)$$

TR = tiempo de riego en horas

Ipp = intensidad de lluvia del aspersor (mm/h)

Normalmente con fines de diseño Efa se considera como 0,75 (75% de eficiencia).

### Número de posturas al día

Como número de posturas al día (NP/día) se conoce al número de operaciones de riego que se pueden realizar en un día de trabajo, y corresponde al número de veces que un conjunto de laterales debe funcionar simultáneamente.. Para ello se utiliza la relación:

$$NP/día = \frac{\text{hora de trabajo efectivo al día}}{\text{Tiempo de riego}} \quad (10)$$

El tiempo efectivo de trabajo debe ser determinado por el diseñador de acuerdo a la realidad local y al tipo de equipo estacionario. Los de cobertura total pueden considerar un mayor número de horas efectivas de riego al día, ya que el cambio de posturas se realiza mediante apertura y cierre de válvulas ubicadas en los laterales. En los equipos semifijos y móviles, el tiempo efectivo de operación se ve reducido ya que se debe contemplar cambio de laterales. Normalmente se consideran 20 horas de riego efectivas, dejándose un margen de 4 horas para el cambio de tuberías, reparaciones y descanso del personal. En caso de equipos móviles y semifijos se pueden considerar como mínimo 12 horas de operación al día. Por otra parte es necesario considerar las horas de viento, de manera que el funcionamiento del equipo se concentre en el período del día de menor viento. Por lo tanto en algunas zonas las horas de riego efectiva no depende de la voluntad del diseñador, sino de las horas en que las condiciones de viento son favorables para la operación del equipo de riego.

#### Disposición, longitud de laterales y número de aspersores por lateral

En general, las laterales son colocadas paralelas a las curvas de nivel del terreno, a fin de evitar diferencias de presión debido a cambios de cota topográfica, dejando la tubería subprincipal en el sentido de la mayor pendiente. En terrenos planos, con pendientes del orden del 1% la topografía no tiene mayor influencia.

Por otra parte, cuando los vientos son fuertes, se recomienda colocar las laterales de manera de formar un ángulo de entre 45° a 90° con respecto a los vientos predominantes, esto permite lograr una mejor distribución del agua.

El proyectista deberá estudiar la situación particular de cada terreno, y en función de esta, y del tamaño del proyecto, debe contemplar el uso de un plano topográfico con curvas de nivel y la geometría del predio. En el plano debe estar señalada la fuente de agua y su cota topográfica.

En base a los aspectos señalados deberá decidir sobre la mejor orientación de los laterales y la ubicación de la tubería subprincipal y principal.

De este análisis saldrá la longitud (o longitudes) de las laterales (ver figura 3 a modo de ejemplo).

En todo caso es necesario recordar, como se verá en el diseño hidráulico, que existe una tolerancia máxima de variación de presiones dentro del sistema, a objeto de que la variación de caudales entre aspersores extremos no supere el 10 a 15 %. Estos aspectos serán considerados en detalle en el diseño hidráulico.

Una vez definida la longitud de la lateral, se procede a estimar el número de aspersores por lateral, lo cual se puede obtener de la siguiente relación:

$$Na = \frac{Ll - (x+y)}{Esl} + 1 \quad (11)$$

Na = número de aspersores en el lateral

Ll = longitud de la lateral

x = distancia entre la tubería subprincipal y el primer aspersor

y = distancia entre el último aspersor al final del campo

Esl = espaciamiento de los aspersores sobre la lateral

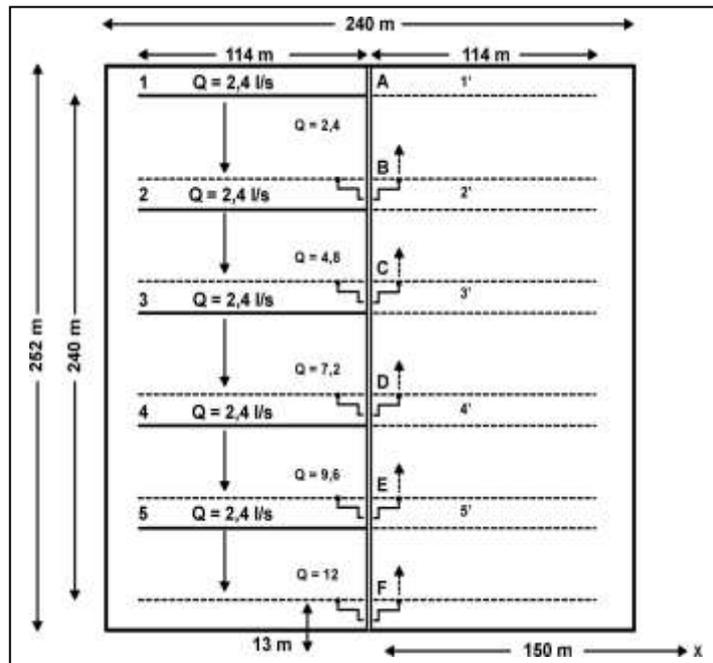


Figura 3 Disposición de laterales y subprincipal

Cuando X e Y, son iguales a ½ de Esl, entonces el número de aspersores sobre la lateral se determina como:

$$Na = \frac{Ll}{Esl} \quad (12)$$

Número de laterales de marcha simultanea para regar la superficie mínima

Para determinar el número de laterales que deberán funcionar simultáneamente para regar la superficie mínima es necesario determinar la superficie de riego de una lateral (SRL). Esta se calcula conociendo el número de aspersores por latera (Na), el área de mojado de cada aspersor (A = Esl\*Eel) y el número de posturas diarias (NP/día):

$$SRL = Na * A * NP/día \quad (13)$$

SRL = superficie que riega cada lateral (m<sup>2</sup>)

Na = número de aspersor por lateral

A = área que moja un aspersor (m<sup>2</sup>)

A = Esl \* Eel

NP/día = número de posturas al día

El número de laterales (NI) necesarias para regar la superficie mínima se calcula:

$$NI = \frac{SMR}{SRL} \quad (14)$$

NI = número de laterales de marcha simultanea para regar la superficie mínima de riego diario

SMR = superficie mínima de riego diario

#### Caudal real requerido

El caudal requerido por cada lateral (ql) se calcula multiplicando el caudal de cada aspersor (qa) por el número de aspersores por lateral (Na).

$$ql = qa * Na \quad (15)$$

El caudal requerido en el sistema (Qt) se calcula multiplicando el ql por el número de laterales necesarias para regar la superficie mínima (NI).

$$Qt = ql * NI \quad (16)$$

#### Ejemplo de diseño agronómico de un sistema de riego por aspersión estacionario

A continuación se presenta un ejemplo de diseño agronómico para un sistema de riego por aspersión estacionario. Se considerará el caso del tipo semifijo, ( tubería subprincipal enterrada y laterales móviles) . Es necesario indicar que los criterios son exactamente los mismos para equipos móviles y fijos, incluyendo cobertura total

- **Datos preliminares:**

- 

Las dimensiones del potrero se presentan en la figura 3

Cultivo = trébol

Lámina de riego neta (Ln): 45 mm

Eficiencia de aplicación (Efa): 75% o 0,75 (valor normal de diseño).

Lámina de riego bruta : 60 mm

Velocidad de infiltración básica: 6,5 mm/h

Etmax: 9 mm/día

Velocidad de viento : 3,5 m/s

Superficie total : 6,05 has (252 m \* 240 m, fig. N° 3).

Topografía plana, con pendiente transversal despreciable y longitudinal de 0,5%.

- **Frecuencia de riego en el mes de máxima demanda (relación 6):**

$$Fr = \frac{45 \text{ mm}}{9 \text{ mm/día}} = 5 \text{ días}$$

- **Superficie mínima de riego diario (relación 7):**

$$SMRT = \frac{6,05 \text{ ha}}{5 \text{ días}} * 7/6 = 1,41 \text{ ha/día}$$

- **Selección del aspersor:**

Se utiliza la información dada por los fabricantes en los catálogos. La presión de operación debe encontrarse entre 2,5 y 3,5 atm, la intensidad de lluvia debe ser inferior a la velocidad de infiltración básica. Es necesario probar con varios aspersores. En el caso del ejemplo, con la ayuda del catálogo modelo presentado en el cuadro 7 se seleccionó el aspersor de boquilla 9/64", cuyas características son:

Presión de operación (PO) = 3,17 atm = 31,7 m.c.a.

Descarga = 0,24 l/s

Diámetro de mojamiento = 25,5 m

Se decidió una disposición en cuadrado. Dado que la velocidad del viento es de 3,5 m/s se considera un traslape de 50% del diámetro de mojamiento (cuadro 6):

$$\text{Espaciamiento} = 25,5 * 50/100 = 12,75 \text{ m}$$

Se escoge 12 m dado que las tuberías se comercializan en tramos de 6 m y 3 m. Se comprueba la intensidad de lluvia, según la relación 8:

$$I_{pp} \text{ (mm/h)} = \frac{0,24 \text{ (l/s)}}{12 \text{ m} * 12 \text{ m}} * 3.600 = 6 \text{ mm/h}$$

La Ipp es inferior a la velocidad de infiltración básica. De no ser así es necesario seleccionar otro modelo de aspersor, con otra boquilla

- **Cálculo del tiempo de riego (relación 9):**

$$TR = \frac{45 \text{ mm}}{0,75 * 6 \text{ mm/h}} = 10 \text{ horas}$$

- **Número de posturas al día (relación 10):**

Se considera 20 horas efectivas de riego, con 4 horas de cambio de tuberías:

$$NP/día = \frac{20 \text{ horas/día}}{10 \text{ horas}} = 2 \text{ posturas al día}$$

- **Disposición y longitud de las laterales:**

De acuerdo a las características del terreno (figura 3) y la dirección de los vientos predominantes, se decide colocar las laterales en el sentido de la menor pendiente (pendiente transversal igual a cero) y en 45° respecto de la dirección del viento. Se decide una subprincipal al centro lo que da una longitud máxima de las laterales es de 114 m, dejando 6 m de distancia entre el último aspersor y el límite del campo.

Como norma general es preferible tener una línea subprincipal al centro, lo que determina laterales más cortas y de menor diámetro.

- **Número de aspersores en la lateral (relación 12):**

Dado que el terreno es regular, se considera que la distancia del primer aspersor a la línea principal es igual a la distancia entre el último aspersor y el borde del campo, se utiliza la relación (12):

$$Na = \frac{114 \text{ m}}{12 \text{ m}} \cdot 9,5 \text{ aspersores} = 10 \text{ aspersores}$$

- **Número de laterales de marcha simultanea para regar la superficie mínima:**

Se calcula la superficie que riega una lateral, según la relación 13:

$$SRL = 10 * (12 * 12) * 2 = 2.880 \text{ m}^2 = 0,29 \text{ ha}$$

Luego, según la relación 14 se determina el número de laterales de marcha simultanea para regar la superficie mínima:

$$Nl = \frac{1,41 \text{ ha/día}}{0,29 \text{ ha/lat}} = 4,9 = 5 \text{ laterales}$$

- **Caudal por lateral y total del sistema:**

Según la relación 15, el caudal por cada lateral es de 2,4 l/s y el caudal total del sistema (relación 16) es de 12 l/s.

## **2.2 Diseño Hidráulico**

Una vez definido los aspectos considerados en el diseño agronómico se procede a realizar el diseño hidráulico, que consiste en determinar los diámetros de las tuberías tanto laterales, subprincipal, principal y de conducción, las presiones requeridas, la selección de la clase de tubería y selección de la bomba.

Previamente a cualquier cálculo se deberá analizar las condiciones topográficas del campo y realizar una planificación física, en el sentido de realizar un análisis sobre la mejor distribución de la red de tuberías. Para ello se realiza un trazado preliminar el cual se va ajustando de acuerdo al cálculo hidráulico que se realiza

### **Dimensionamiento de la tubería lateral**

El dimensionamiento de la lateral consiste en la determinación de la máxima variación de presiones a lo largo de la lateral, el diámetro de la lateral, su largo y la presión a la entrada y al final de la misma.

- Determinación de la variación máxima de presión

El criterio básico de selección del diámetro de las tuberías laterales estipula que la diferencia de caudales entre aspersores extremos de una lateral no debe sobrepasar el 10% del caudal de diseño para una presión dada. Esto significa, que la variación de presión, debido a pérdidas de carga por roce y diferencias de cota entre los extremos de la tubería lateral, entre el primer y último aspersor, no debe ser superior al 20% de la presión de operación del aspersor (ver punto Hidráulica de los aspersores).

La variación de presión máxima aceptable a lo largo de la lateral (var H) queda entonces definida por la relación siguiente:

$$\text{var H} = [P_f + (z)] < 20\% \text{ P.O.} \quad (17)$$

var H = variación máxima de presión en la lateral, en m.c.a.

P<sub>f</sub> = pérdidas por fricción en la tubería, en m.ca

z = diferencia de nivel (o de cotas) entre los extremos de la tubería, en m.

P.O = presión de operación de los aspersores en m.ca

El valor de z podrá ser positivo (+z) si la lateral va contra la pendiente y negativo (- z) si la tubería va a favor de la pendiente. Si la tubería está horizontal z es igual a 0.

- Determinación del largo y diámetro de la lateral

El diseñador, para cumplir con los requisitos señalados en el punto anterior, puede proceder actuando sobre el largo o sobre el diámetro de la tubería, o en condiciones complicadas sobre ambos.

En relación al largo, ya se señaló que es preferible, como norma general, que la subprincipal se coloque formando un eje, de tal forma que las laterales salgan hacia cada uno de los lados de esta tubería, logrando un largo menor y por lo tanto una menor conducción de agua en cada lateral. Lo que significa tuberías de menor diámetro y mayor facilidad para las operaciones de traslado de estas, en caso de equipos semifijos y móviles.

Una vez definido a priori el largo de la lateral, se procede a determinar su diámetro mediante tanteos, hasta que la variación máxima de presión (var H) sea inferior al 20%.

Para ello se utiliza cualquiera de las formulas empíricas que determinan pérdidas de carga en tuberías, en función del gasto que conduce la tubería, de su diámetro y de su longitud.

Sin embargo, debido a que la lateral el gasto va disminuyendo a lo largo de la misma, consecuencia de la salida de agua por los aspersores, la pérdida de carga es necesario corregirla utilizando un factor (factor F) que depende del número de aspersores sobre la lateral.

Este factor toma en cuenta la reducción armónica de caudal que se produce a través de los aspersores a lo largo de la lateral.

Las formulas más utilizadas en aspersión son las de Scobey y Hazzen – Williams.

La formula de Scobey corresponde a

$$Pf = 0,536 * q^{1,9} * D_i^{-4,9} * K_s * L * F \quad (18)$$

Pf = perdidas por fricción en la lateral en m

q = caudal total en la lateral, en l/s

$D_i$  = diámetro interno de la tubería, en pulgadas

L = longitud de la lateral, en m

F = factor de corrección por salidas múltiples para Scobey

$K_s$  = coeficiente de Scobey

$K_s$  = toma los siguientes valores:

0,43 para tubos de aluminio con acoples y de 6 m de largo

0,42 para tubería de aluminio con acoples y de 9 m de largo

0,32 para tubos de PE y PVC

La Fórmula de Hazzen – Williams es la siguiente

$$Pf = 1699,18 * q^{1,851} * D_i^{-4,869} * C^{-1,851} * L * F \quad (19)$$

Pf, q,  $D_i$  y L tienen el mismo significado de la fórmula de Scobey. F corresponde al factor de corrección de salidas múltiples para Hazzen – Williams.

C = coeficiente de Hazzen – Williams y tienen los siguientes valores:

120, para tubos de aluminio con acoples y 6 m de largo;

150, para PVC y PE

Para determinar el valor de F se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$F = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2N} + \frac{[M-1]}{6N^2}^{1/2} \quad (20)$$

Donde **m** adquiere el valor de 1,9 para la fórmula de Scobey y 1,851 para la fórmula de Hazzen – Williams. **N**, corresponde al número de salidas (Nº de aspersores sobre la lateral).

Los valores de F para Scobey y Hazzen – Williams se presenta en el Cuadro 8.

Número de salidas	m = 1,85	m = 1,90
1	1.0	1.0
2	0.639	0.634
3	0.535	0.528
4	0.486	0.480
5	0.457	0.451
6	0.435	0.433
7	0.425	0.419
8	0.415	0.410
9	0.409	0.402
10	0.402	0.396
11	0.397	0.392
12	0.394	0.388
13	0.391	0.384
14	0.387	0.381
15	0.384	0.379
16	0.382	0.377
17	0.380	0.375
18	0.379	0.373
19	0.377	0.372
20	0.376	0.370
22	0.374	0.368
24	0.372	0.366
26	0.370	0.364
28	0.369	0.363
30	0.368	0.362
35	0.365	0.359
40	0.364	0.357
50	0.361	0.355
100	0.356	0.350
Más de 100	0.351	0.345

Cuadro 8. Valores de F para ser utilizado en laterales de riego por aspersión

El cálculo del diámetro de la tubería se realiza entonces por tanteo probando varios diámetros y comprobando si la variación de presión (var H) es inferior al 20% de la presión de operación. Es necesario recordar que varH corresponde a la suma de las pérdidas por fricción (Pf) a lo largo de la lateral y el desnivel del terreno (z) entre los extremos de la lateral.

El cálculo de pérdidas de carga se puede realizar mediante el uso de planillas electrónicas o calculadoras programables, ingresando valores de diámetro de tuberías disponibles en el mercado.

### Ejemplo de cálculo de diámetro de lateral

Tomando en cuenta los antecedentes presentados en el diseño agronómico, se va a calcular el diámetro de la lateral.

Datos:

- a) Largo de la lateral = 114 m
- b) Número de aspersores = 10
- c) Caudal total del lateral = 2,4 l/s
- d) Desnivel (z) = 0, laterales paralelas a las curvas de nivel.
- e) var H máximo 20% P.O = 0.2 \* 31,7m = 6,34 m
- f) se utilizará tubería de aluminio de 6 m de largo, con acoples rápidos.

Las pérdidas de carga se calcularán utilizando la fórmula de Scobey ( $K_s = 0,43$ ).

Se procede a tantear diámetros, utilizando para determinar las pérdidas de carga, en este caso, la fórmula de Scobey (relación 18) y se determina el valor de F utilizando la relación (20) o el Cuadro 8.

Los resultados, aplicando las relaciones 18 y 20' para tuberías de 3" y 2" y 1,5" se presentan en la tabla siguiente adecuadamente programada obtenido en una planilla de cálculo del tipo excel

<b>VarH max</b>	<b>N° Asp.</b>	<b>F</b>	<b>Q l/s</b>	<b>L m</b>	<b>De pul</b>	<b>Di pul</b>	<b>Pf m</b>	<b>% */-</b>	<b>varH cal m</b>	<b>% P.O.</b>
6.34	10	0.396	2.4	114	3.0	2.92	0.285	0	0.285	0.9
6.34	10	0.396	2.4	114	2.0	1.92	2.22	0	2.22	7.0
6.34	10	0.396	2.4	114	1.5	1.42	9.8	0	9.8	31.0

$D_i = D_e - 2 e$ ; e = espesor de la tubería, en las mismas unidades de  $D_e$ , se obtiene de los catálogos de fábrica

Cuadro 9. Ejemplo Cálculo del diámetro de la lateral

De los diámetros probados, solo el de 3 y 2" cumplen con los requisitos (var H < 20% PO), por razones de costos de las tuberías se elige el de 2", aún cuando la variación de presión es mayor que en el de 3".

Es necesario tomar en cuenta que en algunas circunstancias un solo diámetro a lo largo de la lateral, no entrega la pérdida por fricción requerida, necesitando la combinación de tramos de lateral de diámetros distintos (tuberías telescópicas). El uso de tuberías telescópicas es más recomendable utilizarlo en aquellos sistemas estacionarios de carácter fijo permanente. Desde un punto de vista práctico, en los sistemas que implican traslado o transporte de tuberías no es recomendable utilizar en las laterales tuberías telescópicas, sobre todo en laterales móviles, ya que complica demasiado la

operación al obligar a mantener siempre un mismo orden de las tuberías lo que prolonga la labor de cambio. En estas circunstancias es preferible usar un solo diámetro que de pérdidas por fricción inferiores al 20%, y recarguen ligeramente la inversión inicial.

Por otra parte, tampoco es recomendable utilizar en equipos móviles y semimóviles laterales 4" siendo preferible en estos casos elegir aspersores de menor gasto o laterales más cortas, con menor diámetro, dado el peso que estos tubos presentan para su traslado

- Cálculo de la presión en l a cabecera de la lateral

Para calcular la presión en la cabecera de la lateral se toma como criterio que el aspersor medio, ubicado en el punto central (a la mitad) de la lateral, debe trabajar con una presión equivalente a la presión de operación (P.O) definida en la selección del emisor. De acuerdo a las condiciones de pendiente del terreno se tienen los siguientes casos

- Si el terreno es plano (Figura 4):

$$P_m = P_o + \frac{3}{4} * P_f + P_e \quad (22)$$

$P_m$  = presión en la cabecera de la lateral (m),

$P_o$  = presión de operación del aspersor,

$P_f$  = pérdida por fricción,

$P_e$  = altura del elevador que sostiene al aspersor,

$3/4$  = Factor para considerar la presión de operación del aspersor en el centro de la lateral y no en un extremo.

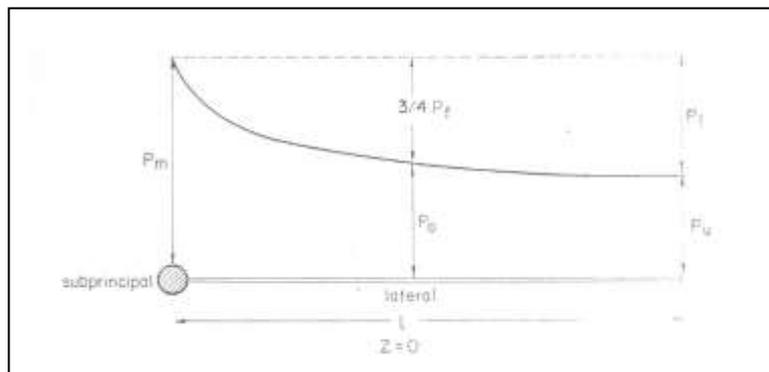


Figura 4 Distribución de las pérdidas de carga a lo largo de una lateral, en terreno plano

- Si el terreno está en pendiente (Figura 5):

En terrenos con pendiente, las laterales pueden estar a favor o en contra de la pendiente

a) Si el sentido de circulación del agua es en contra pendiente (la tubería asciende)

$$P_m = P_o + \frac{3}{4} * P_f + P_e + \frac{Z}{2} \quad (23 a)$$

donde  $Z/2$ , en m, corresponde a la mitad de la diferencia de nivel entre los extremos de la lateral.

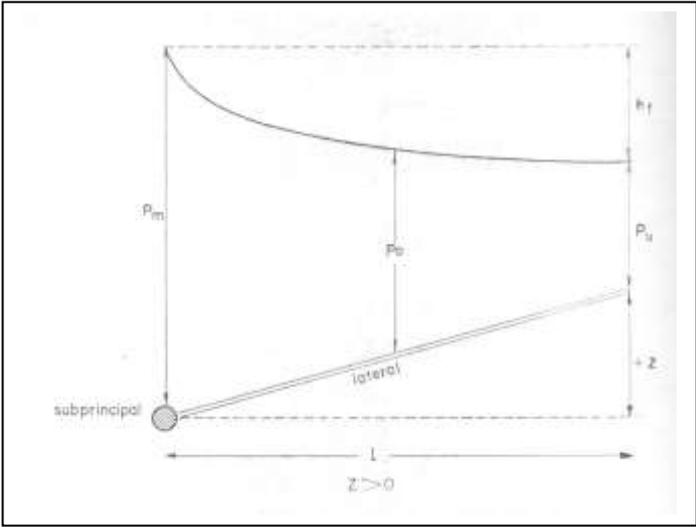


Figura 5a Determinación de la presión de entrada a la tubería lateral contra pendiente

b) Si el sentido de circulación del agua es a favor de la pendiente (la tubería descende)

$$P_m = P_o + \frac{3}{4} * P_f + P_e - \frac{Z}{2} \quad (23 b)$$

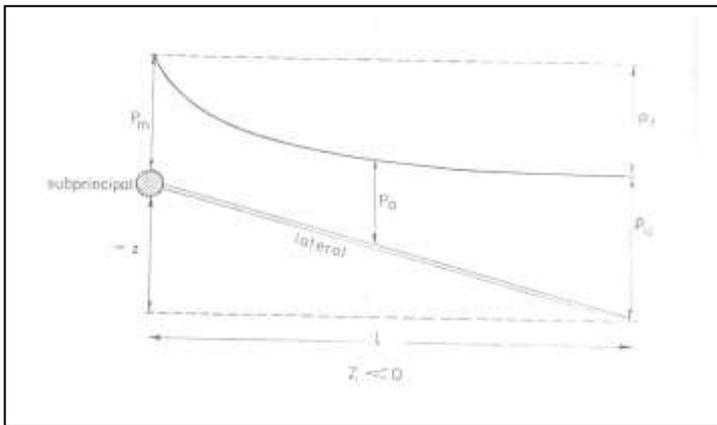


Figura 5b Determinación de la presión de entrada a la tubería lateral a favor de pendiente

En el caso de que en la cabecera de la lateral se coloquen válvulas o reguladores de presión es necesario adicionar a la presión  $P_m$  la pérdida de carga generada por estos accesorios. La pérdida de carga que produce un regulador de presión es función de su diámetro y del caudal, los valores son entregados en los catálogos de fabricación.

Por otra parte, si la subprincipal está enterrada, es necesario agregar la profundidad de la tubería subprincipal.

- Cálculo de la presión al final de la lateral

- Si el terreno es plano:

$$P_u = P_m - P_f \quad (24)$$

$P_u$  = presión en el último aspersor de la lateral

$P_m$  = presión al inicio de la lateral

$P_f$  = pérdidas por fricción a lo largo de toda la lateral

- Si el terreno está en pendiente:

a) Si el sentido de circulación del agua es en contra pendiente (la tubería asciende).

$$P_u = P_m - P_f - Z \quad (25)$$

Donde  $z$ , en m, corresponde a la diferencia de nivel entre los extremos de la lateral.

b) Si el sentido de circulación del agua es a favor de la pendiente (la tubería descende).

$$P_u = P_m - P_f + Z \quad (26)$$

### Ejemplo de cálculo de presión al inicio y final de la lateral

a) Si se toma el ejemplo que se viene desarrollando, tenemos:

$P_f$  para tubería de 2" = 2,2 m

Presión de operación del aspersor 31,7 m

$Z = 0$

Se considera que los aspersores están puestos en un elevador de 0,5 de alto en tubería de 3/4" (las pérdidas de por fricción en el elevador son despreciables: en este caso, aplicando Scobey para 0,24 l/s se tiene una  $P_f$  de 0,03 m).

Según la relación (22) y (24)

$$P_m = 31,7 + 3/4 * 2,2 + 0,5 = 33,85 \text{ mca}$$

$$P_u = 33,85 - 2,2 = 31,65 \text{ mca}$$

b) Si se supone que la lateral está en un terreno con pendiente de 0,20% y el sentido de la circulación del agua es contra pendiente (tubería ascendente).

$$Z = 0,20 * 114/100 = 0,23 \text{ m}$$

Según la relación (23 a) y (25)

$$P_m = 31,7 + 3/4 * 2,2 + 0,5 + 0,23/2 = 33,96 \text{ m}$$

$$P_u = 33,96 - 2,2 - 0,23 = 31,53 \text{ m}$$

c) si se considera que en el mismo terreno la lateral está a favor de la pendiente (relaciones (23 b) y (26):

$$P_m = 31,7 + 3/4 * 2,2 + 0,5 - 0,23/2 = 33,73 \text{ mca}$$

$$P_u = 33,73 - 2,2 + 0,23 = 31,76 \text{ mca}$$

### **Dimensionamiento de la subprincipal porta laterales**

En los sistemas estacionarios de cobertura total y móviles, la tubería se encuentra sobre la superficie de suelo, y normalmente corresponde a aluminio, PVC.o PE. En los equipos de cobertura total, las laterales se conectan a la matriz mediante cruces y válvulas de bola que permiten la apertura y cierre al paso del agua.

En los sistemas semifijo y fijo, la tubería subprincipal va enterrada, a una profundidad variable entre 0,6 a 0,8 m., normalmente en PVC. Desde la tubería enterrada el agua es entregada a la lateral mediante hidrantes, ubicados a una distancia que es múltiplo del espaciamiento entre laterales. En los sistemas semifijos, las válvulas de salida se pueden colocar al doble del espaciamiento entre laterales, de tal manera que desde una válvula se pueden alimentar 3 posiciones de laterales. Dos posturas de la lateral que se conectan directamente a la válvula y una tercera en posición intermedia entre dos válvulas, que se alimenta por un tubo de conexión de longitud, equivalente a la distancia entre laterales, y del mismo diámetro de la lateral

En este caso, tomar en cuenta las pérdidas por fricción en el hidrante ( elevador y en la válvula) y las que se producen en el tubo de conexión.

Para cualquier tipo de sistema estacionario, el dimensionamiento de la subprincipal, que lleva el agua a las laterales, se requiere:

- Determinar su largo.
  - Determinar su ubicación en el campo
  - Determinar el gasto máximo que conducirá la subprincipal en cada tramo de acuerdo a la secuencia de operaciones de las laterales que se definan.
  - Determinar la variación máxima de presión a lo largo de la principal.
  - Determinar pérdidas por fricción en tuberías de diferentes diámetros.
  - Determinar la presión en los nudos que limitan cada tramo de subprincipal, de acuerdo a la secuencia de operaciones de las laterales.
  - Seleccionar los diámetros apropiados.
- Longitud y ubicación de la tubería subprincipal

La longitud de la tubería subprincipal dependerá de las dimensiones del terreno y de la planificación física que se haga del sistema de riego.

En terreno regulares, el largo de la subprincipal corresponderá al largo del terreno, menos la mitad del espaciamiento entre laterales en el extremo final, además es necesario descontar la distancia que existe entre el borde inicial y la primera salida de los aspersores (que en el mejor de los casos puede corresponder a la mitad del espaciamiento entre aspersores). El tramo entre el borde inicial del terreno y la primera salida de lateral se considera como parte de la red principal o de conducción (ver figura 3).

Sin embargo en algunas circunstancias la longitud podrá estar limitada por los caudales a mover o las pendientes del terreno, por sus dimensiones, o por la longitud máxima de las laterales resultando más económico tener subprincipales separadas, alimentadas desde una tubería principal, constituyendo una red (figura 6).

En cuanto a su ubicación, esta puede ser al centro del terreno a regar. Su ubicación queda definida fundamentalmente por la longitud máxima que se le asigna a las laterales.

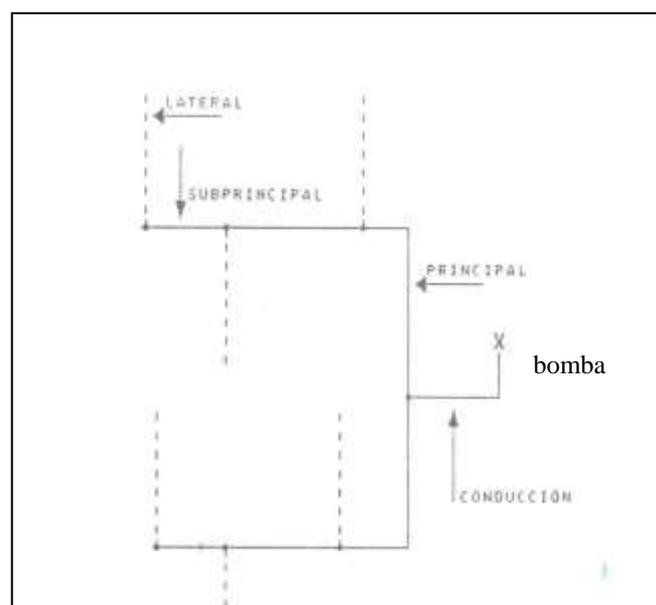


Figura 6 Sistema de aspersión con más de una subprincipal, constituyendo una red

- Gasto máximo de la subprincipal

El gasto máximo que conduce la subprincipal en sus diferentes tramos depende del gasto de cada lateral, del número de laterales que funcionan simultáneamente y de la secuencia de operación que el diseñador establece para ellas. La situación será distinta si todas las laterales que funcionan simultáneamente funcionan como un bloque, o si se distribuyen a lo largo de la subprincipal, formando un mosaico. El funcionamiento en bloque requiere de tuberías de mayor diámetro, ya que en toda la subprincipal circula el caudal total requerido por el sistema. Una secuencia de operación de laterales distribuidas en mosaico ( en toda la subprincipal) permite realizar diseños con tuberías de menor diámetro, ya que el caudal va disminuyendo a lo largo de la tubería, de acuerdo al consumo de las laterales.

Cuando se decide un sistema en mosaico, un análisis de la secuencia de operación de las laterales permite determinar las posiciones críticas que establecerán los máximos flujos de agua en los diferentes tramos de la tubería subprincipal, definiendo los nodos que limitan cada uno de ellos. Este debe ser realizado con cuidado, puesto que será el que límite la capacidad del equipo final del equipo, y el que en definitiva debe ser utilizado en el campo, una vez instalado el sistema, a objeto de no tener problemas posteriores de falta de presión.

Una forma de proceder para realizar este análisis es determinar número de posiciones que cubre cada lateral y ver su secuencia de desplazamiento.

Esto se obtiene a partir del número total de posiciones de las laterales a lo largo de la subprincipal, dividido por el número de laterales de marcha simultanea, determinadas en el diseño agronómico.

Cuando la tubería principal se ubica en el centro del terreno a regar, el número de posiciones totales a lo largo de la tubería subprincipal se determina utilizando la siguiente relación:

$$PTP = \frac{2 * Lep}{Eel} \quad (27)$$

Donde:

PTP : es el número total de posiciones de lateral a lo largo de la subprincipal.

Lep : es la longitud efectiva de la tubería subprincipal, en m.

Eel : corresponde al espaciamiento entre laterales, en m.

El valor 2, indica que las laterales se ubican por ambos lados de la subprincipal determinar la secuencia de operación de las laterales, en el caso de equipos semifijos y móviles, el número de posiciones que cubrirá cada lateral, se procede a dividir PTP, por el número total de laterales de marcha simultanea :

$$P_{pl} = \frac{PTP}{NI} \quad (28)$$

$P_{pl}$  = número de posiciones cubiertas por un lateral

$NI$  = número de laterales de marcha simultánea

Una vez definido la secuencia y/o el número de posiciones cubiertas por cada lateral, cuando corresponda, el diseñador deberá definir si la secuencia se cumplirá por uno o por ambos lados de la subprincipal. En el caso de equipos semifijos y móviles esto último es preferible, puesto que se reduce la distancia de desplazamiento de las laterales, lo que aumentará la eficiencia en el traslado de las tuberías.

Con los criterios señalados se procede gráficamente en el plano a determinar las posiciones críticas de las laterales y tramo u se identifican los nodos.

#### Ejemplo de análisis de secuencia de operación y determinación de gasto máximo por tramo de subprincipal

En el caso del ejemplo que se ha venido desarrollando, el terreno tiene una longitud de 252 m, la subprincipal tiene una ubicación central (ver figura 3), y se determinó la necesidad de contar con 5 laterales funcionando simultáneamente. La distancia entre laterales ( $E_{el}$ ) es de 12 m.

Como se trata de un terreno regular el largo efectivo de la subprincipal ( $L_{ep}$ ) es de  $252 - 12 = 240$  m (se descuentan 6 m en el extremo final y 6 m en el extremo inicial (ver punto Longitud y ubicación de la tubería subprincipal)).

Aplicando las relaciones (27) y (28), como se trata de un sistema semi-fijo, se obtiene un número de 8 posiciones cubiertas por cada lateral. Se decide que cada lateral cubrirá 4 posiciones por cada lado de la subprincipal. (En el caso de proyectos de cobertura total, esta secuencia se da por la forma en que se van abriendo y cerrando las válvulas de bola de las laterales que marchan simultáneamente).

Basado en esta decisión se analiza la secuencia de operación de cada lateral determinándose el caudal que circula por cada tramo de la subprincipal. Esto se muestra en la figura 3, donde se indica además los nodos que limitan cada tramo (A, B, .....). De esta forma hasta el nodo E se moviliza todo el caudal (12 l/s) entre el nodo E y D se movilizan 9,6 l/s (12 l/s - 2,4 l/s), y así sucesivamente hasta llegar al último tramo (A-B), con 2,4 l/s, caudal que corresponde a una sola lateral

- Variación máxima de la presión a lo largo de la subprincipal

Existen varios criterios para determinar la variación máxima de presión a lo largo de la subprincipal.

Uno de ellos establece que la variación máxima de presión a lo largo de esta no sea superior al 15% ("criterio del 15%") de la presión de operación del aspersor:

$$\text{var Hsp} = [P_f + (z)] < 15\% \text{ P.O} \quad (29)$$

Donde  $\Delta H_{sp}$ , corresponde a la variación de presión a lo largo de la subprincipal.  $z$  es positivo (+ $z$ ) si la tubería asciende; y negativo (- $z$ ) si la tubería desciende.

Considerando este criterio para el diseño de la subprincipal (15%), más el límite de 20% de P.O en las laterales, se tiene que la variación máxima de presión entre aspersores extremos del sistema no superará al 35% de la presión de operación del aspersor. Lo anterior significa que la variación de caudal entre el primer aspersor, de la lateral que ocupa la primera posición al inicio del campo, y el último aspersor de la lateral que ocupe la última posición en el extremo distal del equipo, no variará en más de 16%.

Existen otros criterios más exigentes que establecen que la variación de presión en todo el sistema (lateral y subprincipal) no supere el 20% de la PO, con lo que la variación máxima de caudal entre aspersores extremos no supera el 10%.

También es necesario tomar en cuenta que la velocidad del agua dentro de las tuberías debe variar en un rango de 0,6 y 2,25 m/s, siendo recomendable una velocidad en torno a 1 m/s. (entre 1 y 1,5 m/s)

Es necesario señalar que en el caso de sistemas gravitacionales, la principal limitante es la presión disponible, por lo que la selección de diámetros estará limitado por ella. Si la situación está muy ajustada se deberán escoger aquellos diámetros que produzcan las menores pérdidas de cargas posibles.

- Pérdidas por fricción

Para las pérdidas por fricción en tuberías de distinto diámetro se utilizan tanto las fórmulas de Scobey o de Hazzen – Williams.

El cálculo de pérdidas por fricción se realiza tramo a tramo, considerando para varios diámetros, hasta lograr que la variación de presión en la principal no supere el 15% de PO del aspersor.

Si corresponden a un sistema móvil o de cobertura total, y las tuberías son de aluminio, se puede utilizar la fórmula de Scobey. Para tuberías de aluminio, con diámetros en pulgadas, esta fórmula se expresa como en este caso se puede utilizarla

$$P_f = 0,536 * q^{1,9} * D_i^{-4,9} * K_s * L \quad (30)$$

$P_f$  = pérdidas por fricción en la lateral en m.c.a.

$q$  = caudal total en el tramo, en l/s.

$D_i$  = diámetro interno de la tubería, en pulgadas

$L$  = longitud del tramo, en m.

$K_s$  = 0,43, para tubos de 6 m de largo o 0,4 para tubos de 9 m de longitud.

En el caso que se utilicen tuberías de PVC o PE, cuyo diámetro está en mm, la fórmula de Scobey se expresa como

$$P_f = 41 * 10^{-5} * Q^{1,9} * D_i^{-4,9} * K_s * L \quad (31a)$$

$P_f$  = pérdidas por fricción en el tramo de principal considerado, en m.

$Q$  = caudal total en el tramo considerado, en l/s.

$D_i$  = diámetro interno de la tubería, en milímetros

$L$  = longitud del tramo, en m.

$K_s = 0,32$  para tuberías de PVC y PE

También se puede utilizar la fórmula de Hazzen-Williams, utilizando los coeficientes  $C$  apropiados para cada tipo de tubería.( ecuación 31b)

$$P_f = 1,213 * 10^{10} * Q^{1,851} * C^{-1,851} * D_i^{4,869} * L \quad (31b)$$

$P_f$  pérdida de fricción en el tramo

$Q$ , caudal del tramo, en l/s

$D_i$ , diámetro interno de l tubería en mm

$L$ , longitud del tramo, m

Como el cálculo de los diámetros en cada tramo se realiza por tanteo, este se puede estimar por la fórmula empírica, derivada de Bresse, que entrega valores de diámetro interior para diferentes caudales, con velocidades aproximadas de 1,5 m/s, valores en el límite aceptable para el riego por aspersión:

$$D_i = 29,41 * Q^{1/2} \quad (32)$$

Donde  $D_i$  está en mm y  $Q$  en l/s

Para efectuar este cálculo se debe confeccionar una tabla que identifique cada tramo, su caudal, longitud, diámetro y, pérdida de carga y diferencias de nivel Este se puede realizar utilizando una planilla electrónica o calculadoras programables.

- Determinación de presiones en cada nudo de la subprincipal

El cálculo de presiones se inicia por el nudo más distal de la subprincipal, es decir el que corresponde a la posición de la última lateral.

En este punto la presión debe ser igual a la presión requerida al inicio de la lateral ( $P_m$ ), incrementada por las pérdidas de carga debido a la válvula, y al elevador y a la profundidad a la cual está enterrada la subprincipal , en el caso de sistemas fijos permanentes y semi-fijos (normalmente entre 0,6 a 0,8 m):

$$P_{spf} = P_m + P_{fv} + P_{fesp} + P_h \quad (33)$$

$P_{spf}$  = presión en el último nodo de la tubería subprincipal en m.

$P_m$  = presión al inicio de la lateral, en m.

$P_{fv}$  = pérdida de carga debido a la válvula, en m.

$P_{fesp}$  = pérdida de carga debido al elevador de la subprincipal ( si está enterrada)

$P_h$  = profundidad de la subprincipal respecto de la superficie del suelo ( si está enterrada)

En el caso de los sistemas semi-fijos, en que los hidrantes se colocan lateral por medio, es necesario agregar las pérdidas por fricción que ocurre en la tubería que conecta la válvula con la lateral.

La presión en cada nodo de la subprincipal se obtiene adicionando a la presión del nodo anterior las pérdidas por fricción en el tramo, adicionando o restando las diferencias de nivel ( $Z$ ).

Si el terreno es plano:

$$P_{(n)} = P_{(n-1)} + P_{f_{[(n-1)-n]}} \quad (34)$$

$P_{(n)}$  = presión en el nodo  $n$ , en m.

$P_{(n-1)}$  = presión en el nodo anterior

$P_{f_{[(n-1)-n]}}$  = pérdidas por fricción en el tramo limitado por los nodos ( $n$ ) y ( $n-1$ ), en m.

Como ya se indicó, el cálculo se inicia desde el último nodo, el cual tiene una presión  $P_{fsp}$  ( ecuación 33).

Si el terreno es con pendiente, pueden suceder dos situaciones

a) que en la subprincipal el agua circule en contra de la pendiente (la tubería asciende).

$$P_{(n)} = P_{(n-1)} + P_{f_{[(n-1)-n]}} + Z_{[(n-1)-n]} \quad (35)$$

$Z_{[(n-1)-n]}$  = desnivel existente entre los nodos ( $n$ ) y ( $n-1$ ).

b) Que en la subprincipal el agua circula a favor de la pendiente (la tubería descende):

$$P_{(n)} = P_{(n-1)} + P_{f_{[(n-1)-n]}} - Z_{[(n-1)-n]} \quad (36)$$

Finalmente se comprueba si la variación de presión en los extremos de la subprincipal no supera el 15% de la PO. De no ser así se debe cambiar el diámetro de la tubería comenzando por aquel tramo que presenta la mayor pérdida de carga. Es necesario tener presente en el análisis las razones de la variación de presión, en terrenos con mucha pendiente, la topografía puede ser determinante, lo que obligue a utilizar reguladores de presión a la entrada de las laterales.

Todos los cálculos se realizan rápidamente en planillas electrónicas adecuadamente programadas.

### Ejemplo de cálculo de la subprincipal

Este cálculo se puede hacer rápidamente en una planilla electrónica, en este ejemplo se realizará un cálculo paso a paso para fines ilustrativos.

Continuando con el ejemplo que se viene realizando, de un equipo semi-fijo, la tubería subprincipal será de PVC, enterrada a 0,6 m de profundidad, con elevadores de 2", de 0,7 m de alto y una válvula de compuerta del mismo diámetro para conectarse a al lateral. Estos hidrantes están espaciados cada 24 m, de tal manera que una posición de lateral se alimenta desde un tubo de conexión de aluminio, de 12 m de longitud.

El terreno tiene una pendiente de 0,25 %, y el agua circula a favor de la pendiente (ver figura 3)

- En primer lugar se determina varHsp máximo, (15% PO del aspersor)

$\text{varHsp} = 0,15 * 31,7 = 4,75 \text{ m}$ ; incluye pérdidas de carga (Pf) y variaciones de nivel (relación 29).

- En segundo lugar se calcula la presión requerida en el último nodo (Pspf), según la relación (33).

De acuerdo al ejemplo que se viene realizando, la presión requerida al inicio de la lateral (Pm) es 33,85 m.

La pérdida en un elevador (Pfsp) de 2", para 2,4 l/s (gasto de cada lateral) es de 0,3 m/m aproximadamente ( ecuación de Scobey cuadro 16), por lo que la a pérdida por fricción en 0,7 m de longitud es de 0,21 m.

La pérdida en la válvula (Pfv), ( cuadro 17), es equivalente a la producida en una tubería de 2" de 2 m de longitud, para el caudal pasante (2,4 l/s). Aplicando Scobey se tiene 0,2 m de pérdida

La subprincipal está enterrada a 0,6 m (Ph),. por lo tanto ( ecuación 33)

$$\text{Pspf} = 33,85 + 0,21 + 0,2 + 0,6 = 34,86$$

Se aproxima a 35 m.

A lo anterior es necesario agregar la pérdida de carga que se produce en el tubo de conexión de 12 m de longitud que alimenta la lateral que opera entre dos válvulas. Se supone de 2" de diámetro.

Según Scobey ( $K_s = 0,43$ ), para 2,4 l/s y 12 m,  $P_f = 0,5$  m, por lo que finalmente:

$$P_{spf} = 35 + 0,5 = 35,5 \text{ m}$$

- en tercer lugar, utilizando la fórmula derivada de Bresse se determina el diámetro aproximado para cada tramo (relación 32), para luego iniciar el tanteo con varios diámetros:

tramo A-B, 2,4 l/s,  $D = 45,5$  mm ; D externo comercial próximo, 50 mm.

tramo B-C, 4,8 l/s,  $D = 64,4$  mm;

tramo C-D, 7,2 l/s,  $D = 78,9$  mm;

tramo D-E, 9,6 l/s,  $D = 91,1$  mm;

tramo E-F, 12 l/s,  $D = 101$  mm; D externo comercial próximo, 110 mm.

- En cuarto lugar se inicia el cálculo de  $P_f$ , según Scobey ( $K_s = 0,32$  para PVC liso), para cada tramo y varias tuberías partiendo de 50 mm hasta 125 mm, un diámetro superior al determinado. Para el cálculo se utiliza el diámetro interno del tubo por lo que es necesario descontar el espesor que dan los catálogos de los fabricantes ( $D_i = D_e - 2e$ ).

-  
.

Tramo	q (l/s)	PERDIDAS POR FRICCION (m) EN CADA TRAMO						
		L (m)	Diámetros exteriores seleccionados					
			50	63	75	90	110	125
A-B	2.4	4.8	2.58	0.83	0.35	0.14		
B-C	4.8	4.8		3.09	1.32	0.54	0.20	
C-D	7.2	4.8			2.85	1.16	0.44	0.23
D-E	9.6	4.8			4.93	2.01	0.76	0.40
E-F	12.0	4.8			7.53	3.07	1.15	0.62

Cuadro 9. Pérdidas de carga en las tuberías de los diferentes tramos de subprincipal

- En quinto lugar se realiza el cálculo de la variación de presión ( $\text{varH}_{sp}$ ), comenzando por los diámetros estimados a partir de la relación de Bresse. Si esta solución sobrepasa el 15% de PO, se comienzan a aumentar los diámetros, partiendo por aquellos que producen las mayores pérdidas de carga.

En este caso dado que la tubería desciende (está a favor de la pendiente) Z tiene signo menos y  $\text{varH}_{sp} = P_f - Z$ .

- Z se calcula a partir de la pendiente del terreno (0.25%) y de la longitud de cada tramo:

$$-z = P\% * L_{[(n-1) - n]}/100 = 0,25 * 48/100 = -0,12 \text{ m.}$$

La secuencia de cálculos se presentan en la tabla siguiente:

En ella se aprecia que los diámetros estimados por la relación de Bresse sobrepasan el 15%, por lo que se fue variando el diámetro de los tramos partiendo por los de mayor Pf, hasta llegar a la solución adecuada, representada por el tanteo.

Datos					Diámetros Bresse			Tanteo		
Tramo	Q (l/s)	P%	L (m)	Z (m)	D (mm)	Pf (m)	VarHsp	D(mm)	Pf (m)	VarHsp
A-B	2.4	0.25	48	-0.12	50	2.58	2.46	63	0.83	0.71
B-C	4.8	0.25	48	-0.12	63	3.09	2.97	75	1.32	1.2
C-D	7.2	0.25	48	-0.12	75	2.85	2.73	90	1.16	1.04
D-E	9.6	0.25	48	-0.12	90	2.01	1.89	110	0.76	0.64
E-F	12.0	0.25	48	-0.12	110	1.15	1.03	110	1.15	1.03
<b>Total</b>							<b>11.08</b>		<b>5.22</b>	<b>4.62</b>
<b>% P</b>							<b>34.95</b>			<b>14.57</b>

Cuadro 11. Diámetro de tubería para cada tramo de la subprincipal

Finalmente se determinaron las presiones en cada uno de los nodos, aplicando la relación (36), partiendo del último nudo (A) cuya presión (Pspf) es de 35,5 m.

$$P(A) = P_{spf} = 35,5 \text{ m}$$

$$P(B) = 35,5 + 0,83 - 0,12 = 36,21 \text{ m}$$

$$P(C) = 36,21 + 1,32 - 0,12 = 37,41 \text{ m}$$

$$P(D) = 37,41 + 1,16 - 0,12 = 38,45 \text{ m}$$

$$P(E) = 38,45 + 0,76 - 0,12 = 38,95 \text{ m}$$

$$P(F) = 38,95 + 1,15 - 0,12 = 40,12 \text{ m}$$

Es necesario tomar en cuenta que en determinadas circunstancias el criterio de 15% no puede ser aplicable. Por ejemplo en el caso de sistemas de riego en laderas donde la fuente de agua se encuentra en la parte más baja. El uso del criterio 15% resultaría en subprincipales muy cortas. Para evitar las variaciones de presión excesivas entre laterales, se pueden utilizar reguladores de presión en cada una de ellas. Las pérdidas de carga que producen estos reguladores se obtienen de los catálogos de los fabricantes.

Por otra parte, en el caso contrario, es decir cuando la tubería desciende en terrenos con mucha pendiente, el efecto de la gravedad (z), significa ganancias importantes de presión a lo largo de la subprincipal, lo que permite producir pérdidas de fricción altas, utilizando tubos de menor diámetro. Se podría incluso llegar a utilizar diámetros de tubería tales que la pérdida por fricción sea muy similar a z, y mantener presiones bastante uniformes a lo largo de la tubería.

### **Tuberías principales y de conducción**

Este tipo de tuberías están presentes en sistemas grandes compuestos por varias subprincipales con sus respectivas laterales (Figura 6). Las tuberías principales llevan agua a los diferentes puntos del terreno para alimentar subprincipales, formando una verdadera red y su diseño depende de la secuencia de operaciones de las diferentes subprincipales que componen el sistema y de los caudales a transportar. En este caso es

importante mantener un equilibrio de caudales entre los diferentes subprincipales que conforman la red.

La tubería de conducción corresponde a la tubería que lleva el agua desde la fuente hasta el primer nodo de las principales.

En los sistemas pequeños, que cuentan de una subprincipal, la tubería de conducción y la principal son equivalentes.

En este tipo de tuberías, las pérdidas por fricción y la velocidad del agua en las tuberías es la principal consideración en el diseño.

Donde se utiliza presión debida a la gravedad, o sea por diferencia de elevación entre la fuente de agua y el terreno a regar, se pueden presentar 2 situaciones:

- a) La diferencia de alturas es apenas suficiente para proporcionar una presión adecuada de funcionamiento, en este caso será necesario usar tubos de mayor diámetro y minimizar las pérdidas por fricción para evitar bombeo.
- b) Cuando la diferencia de alturas es muy superior a la necesaria, el problema radica en reducir el exceso de presión, lo cual se logra utilizando tuberías de poco diámetro.

Donde la presión requerida proviene de bombeo, el problema consiste en seleccionar los diámetros y materiales de la tubería principal que darán como resultado un equilibrio razonable entre los costos anuales de bombeo y el costo de tubería. El objetivo es el diseño de menor costo.

- Criterios para la determinación del diámetro de la tubería

- Método de la pérdida de carga unitaria

Consiste en seleccionar los diámetros de las tuberías de manera que las pérdidas por fricción no excedan a 0,023 m/m de tubería.

- Método de la velocidad permisible

Este método establece una velocidad límite máxima en la tubería principal. Los valores más comunes a usar son entre 0,6 y 2,25 m/s. Por debajo del primer valor los diámetros son excesivos y la tubería es cara. Para las velocidades superiores a 2,25 las pérdidas de carga adquieren valores muy elevados que sobrecargan excesivamente la bomba y aceleran el envejecimiento de la tubería. Sin embargo se recomienda no sobrepasar valores de velocidad de entre 1 y 1,5 m/s. Es necesario tener presente, como se verá más adelante, que la velocidad del agua dentro de la tubería tiene alta incidencia en el golpe de ariete que produce la detención instantánea del sistema de riego

El diámetro se puede estimar a partir de la relación (32), y comprobar si la velocidad del agua se encuentra entre 1 y 1,5 m/s.

Una vez obtenido el diámetro se estiman las pérdidas por fricción para calcular finalmente los requerimientos de impulsión.

-Fórmula de Mendiluce:

Existen una serie de fórmulas clásicas que permiten estimar el diámetro óptimo de las tuberías principales y de conducción, partiendo de ciertas hipótesis que relacionan el diámetro de la tubería con el costo de la energía, el costo de la tubería y la amortización, entre otros aspectos.

Una de las fórmulas es la de Mendiluce, la cual supone que el costo de la tubería varía linealmente con su diámetro y el flujo es turbulento.

La fórmula de Mediluce es:

$$D = 1,913 * [(k * p * N) / (Pt * a * efb)]^{0,167} * Q^{1/2} \quad (37)$$

D = diámetro interior de la tubería, en m

k = coeficiente de pérdida de carga de la tubería

p = precio del kwh

Pt = costo de la tubería

N=número de horas de bombeo al año

a = factor de amortización

efb= eficiencia del grupo motobomba

Q= caudal en m<sup>3</sup>/s

Para determinar k se emplea la siguiente expresión:

$$K = 10,54 / C^{1,851} \quad (38)$$

C = coeficiente C de la fórmula de Hazzen-Williams, que depende del material de construcción de la tubería.

El factor de amortización se determina :

$$a = [(1 + r)^t * r] / [(1 + r)^t - 1] \quad (39)$$

donde:

r = interés en tanto por uno

t = período de amortización de la tubería

- Método de la comparación de costos:

Se trata de seleccionar los diámetros en los cuales la suma de los costos fijos de la tubería y de los costos de energía son mínimos. Para ello se debe determinar para cada diámetro de tubería los costos fijos anuales, el costo unitario de energía al año, las

pérdidas por fricción en m/m de cada tubería seleccionada, la potencia requerida para vencer las pérdidas de carga, hasta llegar a determinar la suma mínima de costos fijos y de energía.

- Método simplificado de las diferencias:

Consiste en analizar las diferencias de costos fijos anuales entre dos diámetros y determinar el caudal límite en el cual los costos de energía, debido a la mayor fricción en la tubería de menor diámetro, son iguales a las diferencias de costos fijos debidos al precio más elevado de la tubería de mayor diámetro.

- Programación lineal:

La programación lineal es una técnica matemática, que permite la optimización de soluciones. El enunciado matemático completo de un problema de programación lineal incluye un conjunto de ecuaciones lineales simultáneas, las cuales representan las condiciones del problema, y una función lineal que expresa el objetivo del problema.

Ejemplo de cálculo de la tubería de conducción utilizando criterios de la pérdida unitaria y velocidad del agua :

En el ejemplo que se viene realizando, la distancia entre la primera válvula y la fuente de agua de los 165 m. se considera que la diferencia de nivel entre los extremos es despreciable.

Aplicando el método de la pérdida de carga unitaria (0,023 m/m de tubería), las pérdidas máximas en la conducción no debieran superar los 3,8 m (0,023 \* 165):

Para determinar el diámetro de la tubería o de las tuberías que cumplen con esta condición se procede por tanteo, utilizando la fórmula de Scobey para el gasto que conduce la tubería (12 l/s) considerando un largo unitario (1 m).

Aplicando Scobey se tiene por diámetros de 90, 110 y 125 mm se tiene:

<b>Diámetro en mm</b>	<b>Pf en m/m</b>	<b>V(m/s)</b>
90	0.064	2,10
110	0.025	1.39
125	0.013	1.07

De acuerdo a la tabla, un diámetro de 90 mm tiene pérdidas que exceden con creces el límite de 0,023 m/m y la velocidad es de 2,1 m/s. La tubería de 110 mm está en un rango aceptable ( 0.025 m/m) y con una velocidad inferior a 1,5 m/s por lo que es posible aceptar este diámetro. El diámetro 125 mm presenta pérdidas de carga muy bajas, aún cuando la velocidad del agua esta cerca de 1 m/s.

En consecuencia, las pérdidas de presión a lo largo de la tubería principal (110 mm) son:

$$0,025 \text{ m/m} * 165 \text{ m} = 4,112 \text{ m};$$

La presión manométrica requerida en la fuente de agua corresponde a la presión en el nudo F más las pérdidas por fricción en la conducción (se considera que el terreno es plano,  $z=0$ ):

Por lo tanto la presión requerida en la fuente de agua es de

$$40,12 + 4,12 = 44,24 \text{ m}$$

Como se verá más adelante para calcular la presión de impulsión de la bomba es necesario adicionar las pérdidas singulares.

- Cambios de diámetro en la tubería de conducción

En ciertas circunstancias el uso de un solo diámetro en las tuberías de conducción entrega el resultado óptimo respecto de las pérdidas de fricción. En otras es necesario realizar cambios de diámetro en el recorrido de las tuberías, que permitan ajustarse en mayor medida a los límites de presiones disponibles a los rangos de variación que se establece el proyectista.

La longitud correspondiente a cada diámetro se puede estimar de la relación siguiente

$$Pf = Pf_{\phi_1} * L_1 + Pf_{\phi_2} * (L_t - L_1) \quad (40)$$

$Pf$  = pérdidas totales en el tramo

$Pf_{\phi_1}$  = pérdidas unitarias (m/m) en tubería de diámetro 1.

$Pf_{\phi_2}$  = pérdidas unitarias (m/m) en tubería de diámetro 2.

$L_1$  = longitud del tramo con tubería diámetro 1.

$L_t$  = longitud total del tramo considerado.

$(L_t - L_1)$  = longitud del tramo con tubería de diámetro 2.

En el ejemplo que se viene realizando, se pudo ver que ninguna de las tuberías consideradas (90,110 y 125) se ajustaban al criterio de pérdida unitaria de 0,023 m/m, para seleccionar el diámetro óptimo. La más próxima es la de 110 mm (0,025 m/m), seguida de la tubería de 125 m

Si se quiere mantener una pérdida unitaria promedio de 0,023 m/m en la tubería de conducción, la cual tiene una longitud de 165, significaría una  $Pf$  de 3,8 m en toda la tubería de conducción. Lo anterior se lograría utilizando utilizar una combinación de diámetros entre 110 y 125 mm.

$$3,8 = 0,025 * L_{110} + 0,013 * (165 - L_{110})$$

$$L_{110} = \frac{3,8 - 0,013 * 165}{(0,025 - 0,013)} = 138 \text{ m};$$

La longitud de la tubería de 110 mm es de 138 m

La longitud en 125 mm, es de  $160 - 138 = 27$  m;

La conducción debiera estar compuesta por 138 m de tubería de 110 mm y 27 mm de tubería de 125 mm.

En este caso la presión manométrica en la fuente de agua, sin considerar las pérdidas singulares, corresponde a:

$$40,12 + 3,8 = 43,92 \text{ m}$$

### **Determinación de las pérdidas singulares**

Se denomina pérdidas singulares a aquellas pérdidas menores debido a codos, tees, reducciones uniones, accesorios en general, etc. Es necesario tomar en cuenta su magnitud y sumarlas a las pérdidas por fricción.

Las pérdidas singulares se pueden calcular de la siguiente expresión :

$$P_s = K \cdot V^2 / 2g \quad (41)$$

Donde :

$P_s$  es la pérdida de carga debido a la singularidad en m

$K$  es un coeficiente de pérdida de carga que depende del tipo de singularidad

$V$  es la velocidad del agua en la tubería, en m/s

$G$  es la aceleración de gravedad ( $9,8 \text{ m/s}^2$ )

Valores de  $K$  para diferentes singularidades se presentan en el anexo

Más adelante se entregan algunos criterios para determinar pérdidas en accesorios.

En el diseño de equipos complejos se debe hacer un inventario de todos los accesorios que están presentes en la red y determinar sus pérdidas de acuerdo a lo establecido en los catálogos de los fabricantes.

**En sistemas sencillos y relativamente pequeños, las pérdidas singulares se pueden estimar como un 20% de las pérdidas por fricción totales.**

En el caso que se incluyen reguladores de presión, las pérdidas por fricción de estos reguladores se determinan de los catálogos de fabricación.

### **Ejemplo de cálculo de pérdidas singulares**

Dada la sencillez del diseño que se viene realizando, las pérdidas singulares se estimarán como un 20% de las pérdidas totales por fricción:

Pérdidas en la lateral : 2,22 m  
 Pérdidas en la subprincipal : 5,98 m  
 Pérdidas en la conducción : 4,12 m  
 Total pérdidas por fricción : 12,32 m

Pérdidas singulares :  $0,2 * 12,32 = 2,46$  m

Los requerimientos totales de presión en la fuente de agua o requerimientos de impulsión o altura dinámica de impulsión :

$$44,24 + 2,46 = 46,7 \text{ m} = 47 \text{ m}$$

### **Determinaciones de los requerimientos de impulsión**

Para determinar la dimensión de la unidad de bombeo es necesario conocer las condiciones máximas de operación a saber: el caudal y la carga dinámica total.

El caudal está determinado por el gasto máximo del equipo de riego por aspersión y la carga dinámica total, que corresponde a la suma de la altura dinámica de impulsión o presión de impulsión, más la altura dinámica de succión. La altura dinámica de impulsión comprende la suma de la presión de operación de los aspersores (PO), más todas las pérdidas por fricción, singulares y desnivel existentes entre el punto de bombeo y la lateral más lejana, adicionando las pérdidas que se produce en la válvula de retención, ubicada a la salida de la bomba y la de cualquier otro elemento que se incluya en el cabezal de bombeo ( ejemplo llaves de paso, filtros etc).

La altura dinámica de succión está dada por la diferencia de nivel entre la bomba y el espejo del agua, las pérdidas de carga en la tubería de succión y en los accesorios, como es la válvula de pie.

Los requerimientos de potencia de la bomba y su motor se pueden calcular:

$$HP = \frac{Q * CDT}{75 * (Efb/100)*(Efm/100)} \quad (42)$$

Q = caudal total, l/s

CDT = presión manométrica total o carga dinámica total, en m.

Efb = eficiencia de la bomba

Efm = eficiencia del motor

La formula anterior entrega la potencia consumida en condiciones de régimen, es decir con el equipo en operación. La potencia consumida al hacer partir el equipo, durante el proceso de llenado del sistema, es mayor, por lo cual hay que considerar motores de mayor potencia que el entregado por la relación (42), como se verá más adelante.

Un punto importante a considerar al momento de calcular y seleccionar una bomba tiene que ver con la aspiración del agua .Existen ciertas limitaciones en relación a la altura de aspiración que hay que respetar para que las bombas no entren en cavitación.

Generalmente las bombas centrífugas pueden trabajar con una altura total de aspiración de 6 m, tratándose de agua, sin embargo algunas publicaciones. han fijado como altura de aspiración máxima normal, al nivel del mar, 4,50 metros Naturalmente mientras mayor es la altura sobre el nivel del mar a la cual funciona la bomba, menor debe ser la altura de aspiración, como dato práctico de gruesa aproximación se puede decir que la altura de aspiración disminuye en 1,20 m por cada 1.000 m de altura en condiciones medias.

Las bombas deben ser seleccionadas por catálogos, en los cuales se puede analizar la curva característica de la bomba, su eficiencia, el rodete más adecuado, la potencia requerida y el NSPH (Net Positive Suction Head) requerido, Este dato comprende la altura de velocidad de la brida de aspiración de la bomba, variable con el caudal que la bomba suministra, más las pérdidas que se producen en la citada brida y el impulsor.

Por lo tanto la altura dinámica de succión, incluyendo el la diferencia de altura respecto del espejo de agua, las pérdidas de carga en la succión y en la válvula de pie, pueden sumar como máximo alrededor de 5 m y una velocidad de entre 1 a 2 m/s Sin embargo hay que tomar en cuenta el NSPH de la bomba, puesto que este valor limitará la altura dinámica de succión. A mayor NSPH menor deberá ser la altura dinámica de succión. Cuando el NSPH de las bombas es muy alto, las bombas deben quedar con succión positiva, de lo contrario se produce cavitación.

#### Ejemplo de cálculo de potencia de la bomba

En el ejemplo que se viene realizando, la presión de impulsión corresponde a 47 m, sin contar las perdidas en la válvula de retención y el la válvula de paso del sistema. Se cuenta con una válvula de retención de 110 mm y una válvula de compuerta del mismo diámetro.

La bomba está instalada a 2 metros de la superficie del agua, con un chupador de 125 mm, con una válvula de pie del mismo diámetro (5"), a la salida tiene una válvula de retención de 4" y una llave de compuerta del mismo diámetro.

La CDT es :

Altura dinámica de impulsión

Presión de impulsión a la salida de la bomba : 47 m

Pérdidas en la válvula de retención y compuerta : 0,3 m (Scobey cuadro 16

Altura dinámica de succión

Altura de succión : 2 m

Pf en chupador de 125 mm y válvula de pie : 0.4 m (Scobey y cuadro 17)

---

CDT 49,7 m (50 m.c.a)

Si se trata de La potencia requerida, considerando una eficiencia de 70%, por tratarse de una motobomba eléctrica es de:

$$HP = \frac{12 * 54,5}{75 * 0,75} = 11,6 = 12 \text{ HP, que corresponde al consumo en régimen}$$

Sin embargo, es preferible seleccionar las bombas a partir de las curvas características, proporcionan los fabricantes para cada uno de los modelos de bombas de que disponen. Estas curvas muestran la interrelación entre el caudal, la carga dinámica total, la potencia y la eficiencia, para diferentes velocidades de rotación.

En la Figura 7 se muestra una curva característica de bomba. Para el caso del ejemplo, una a CDT de 50 m y un gasto de 12 l/s (43 m<sup>3</sup>/hr), es proporcionado por una bomba con una rodete de 190 mm de diámetro, funcionando con una eficiencia de 75%., con un NSPH de 2 m.

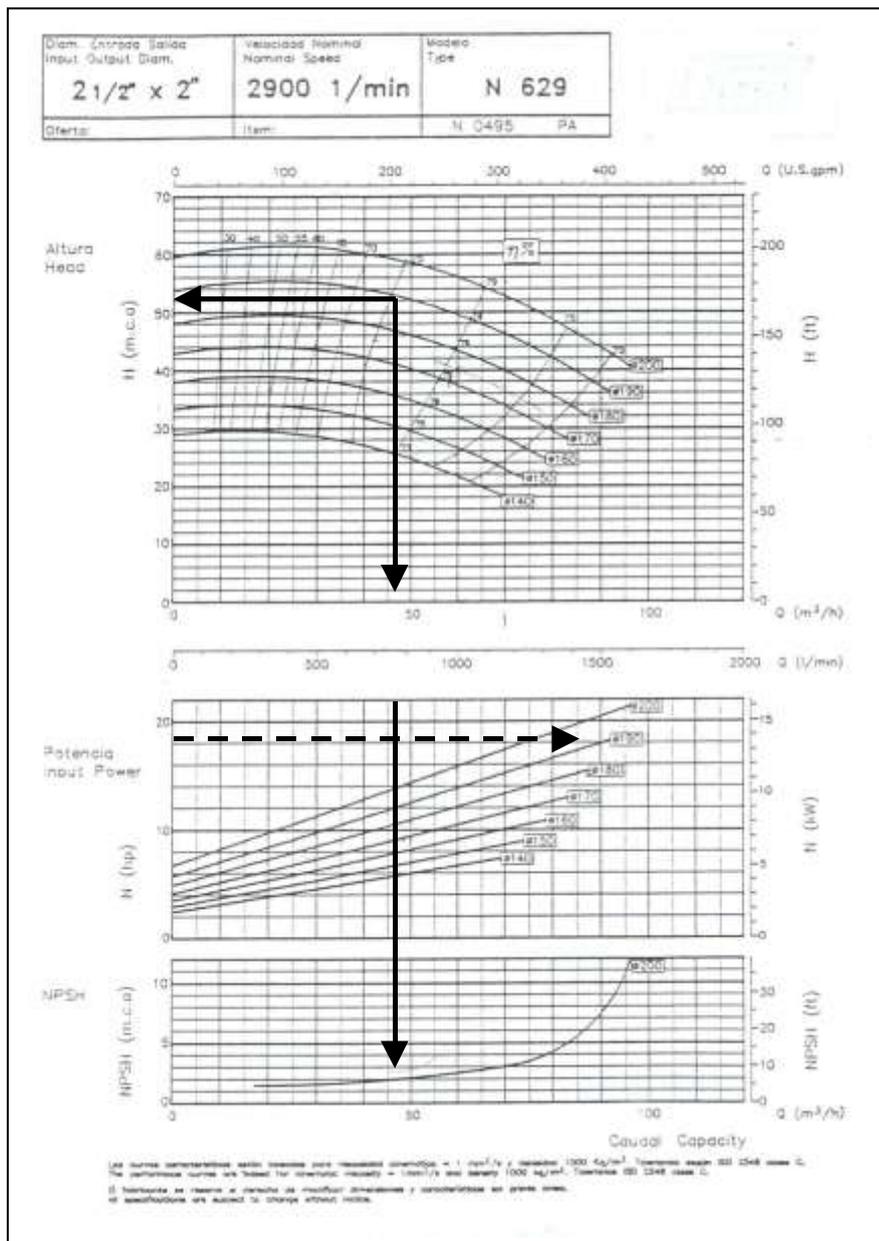


Figura 7 Curva característica de una motobomba eléctrica.

De acuerdo a esta curva, el consumo de potencia en régimen ( sistema lleno) es de 12 HP, sin embargo la potencia del motor hay que seleccionarlo al extremo de la curva de descarga de la bomba, para el rodete seleccionado (190 mm), con el objeto de considerar una cantidad de energía adicional que demandará el sistema cada vez que se llenen las tuberías a la partida. Por lo tanto, en el caso de este ejemplo, será necesario seleccionar un motor de 20 HP. Si se coloca un motor de menor potencia, se deberá llenar el equipo abriendo lentamente la válvula ubicada a la salida de la bomba.

En ciertos casos es preferible considerar el uso de bombas en paralelo, que impulsen la mitad del caudal cada una a la CDT requerida por el equipo de riego. De esta forma, se puede lograr una disminución del NSPH de la bomba y en caso de pana de una bomba, se podrá mantener el riego en forma parcial mientras dure la reparación.

Cuando las presiones requeridas son muy altas, se pueden poner bombas en serie, de tal manera de aumentar la presión, manteniendo el mismo caudal

### **Selección de la clase de tubería a utilizar**

La clase de la tubería corresponde a la resistencia a la presión de trabajo que estas están sometidas. Las diferentes clases de tubería y las resistencias máximas a la presión se presentan en el Cuadro 12.

Clase	Presión nominal de trabajo a 20° C		
	Kg/cm <sup>2</sup>	Lbs/plg <sup>2</sup>	m.c.a.
4	4	60	40
6	6	90	60
10	10	150	100

Cuadro 12. Clase de tubería para conductos cerrados, a presión

La clase de tubería a utilizar se selecciona según la presión máxima a la que estarán sujetas las tuberías en cada tramo de la instalación. La presión máxima puede quedar dada por dos situaciones. Una es la presión dinámica que existe en los diferentes tramos o segmentos de la red hidráulica, que se manifiesta mientras el equipo esta en operación. La otra puede quedar dada por la detención brusca del equipo, donde hay que entrar a considerar la suma de la presión estática, dada por las diferencia topográficas, y de la presión que genera el golpe de ariete.

### **.Golpe de Ariete**

Se conoce como golpe de ariete a la sobre presión, respecto de la presión estática (diferencias topográficas) del sistema, que se origina al detener súbitamente el flujo de agua en una tubería de conducción de agua a presión. Este incremento de la presión se produce por la transformación de la energía cinética del agua en energía de presión. Se puede graficar el fenómeno asimilándolo al choque de un convoy de ferrocarril contra un obstáculo, deteniendo violentamente su movimiento y ocasionando un avance y

retroceso de los carros después del choque, aumentando la presión sobre el obstáculo, hasta al reposo.

El golpe de ariete se puede producir por las siguientes razones:

- Apertura o cierre muy rápido de una válvula
- Golpe externo que origina la rotura de una tubería
- Al comenzar el funcionamiento de una bomba
- Al parar el funcionamiento de una bomba

Para calcular el golpe de ariete existen dos situaciones:

- a) Cuando la detención del flujo se produce en forma instantánea, por cerrado rápido de válvulas, parada de bombas o rotura de tuberías (tiempo de parada inferior al “tiempo crítico”).
- b) Cuando el cierre de las válvulas se produce en un tiempo superior al “tiempo crítico”.

Se entiende por “tiempo crítico” ( $T_c$ ) al tiempo de traslado de la onda de presión (ida y vuelta) a lo largo de la tubería de conducción. El  $T_c$  se calcula según la siguiente ecuación:

$$T_c = \frac{2 * L}{V_w} \quad (43)$$

$L$  = Longitud de la tubería, en m.

$V_w$  = Velocidad de la onda de propagación (m/s)

$V_w$  se calcula a partir de la expresión siguiente:

$$V_w = 1.420 * [e * E / (e * E + K * D_e)]^{1/2} \quad (44)$$

Donde:

1.420 = corresponde a la velocidad de las ondas sonoras en el agua (m/s).

$e$  = Espesor de la tubería (m)

$E$  = Módulo de elasticidad de la tubería ( $\text{kg/m}^2$ )

$K$  = Módulo de elasticidad del agua ( $\text{kg/m}^2$ )

$D_e$  = Diámetro externo de la tubería (m)

Módulos de elasticidad para tuberías de diferentes materiales y para el agua se presentan en el Cuadro 13.

Material	Módulo de elasticidad
Asbesto cemento	$2,4 * 10^9$
PVC	$3,0 * 10^8$
Agua	$2,0 * 10^8$

Cuadro 15. Módulo de elasticidad de materiales usados en tuberías y para el agua (kg/m<sup>2</sup>)

Situación a):

En esta situación de detención instantánea del flujo, el cálculo del golpe de ariete se obtiene de la siguiente expresión:

$$H = 0,0101 * V_o * [(K * E * e) / (e * E + K * D_e)]^{1/2} \quad (45)$$

H = Golpe de ariete, en m.

V<sub>o</sub> = Velocidad de circulación del agua en la tubería, antes del cierre o detención del flujo (m/s).

También se puede utilizar la fórmula de Joukovsky :

$$H = V_w * V_o / g \quad (46)$$

H = Golpe de ariete en m

V<sub>w</sub> = velocidad de la onda de propagación ( ecuación 44)

g = aceleración de gravedad ( 9,8 m/s<sup>2</sup>)

Una aproximación de la magnitud del golpe de ariete para tuberías de PVC y PE se puede obtener de una aplicación simplificada de la ecuación de Joukovsky, considerando el término: a V<sub>w</sub>/g con un valor de 24,7.

$$H = 24,7 * V_o \quad (47)$$

Situación b) :

En caso de un cierre suave, con tiempos superiores al crítico, se puede utilizar la fórmula de Michaud:

$$H = \frac{L * V_o}{g * T} \quad (48)$$

$g$  = Aceleración de gravedad ( $9,8 \text{ m/m}^2$ )

$T$  = Tiempo efectivo del cierre en s.

El cálculo de la presión correspondiente al golpe de ariete tiene mucha importancia en sistemas de cierta magnitud, en particular en terrenos con pendiente.

Para la selección de tuberías (Clase) es necesario conocer la presión máxima a la que estará sometido el sistema de riego.

Para ello para diferentes tramos del sistema se debe conocer la presión dinámica y la magnitud de la suma de la presión estática más el golpe de ariete.

La clase de tubería se selecciona de acuerdo a la presión que presente la mayor magnitud (presión dinámica o suma de la presión estática más el golpe de ariete).

### **Criterios de diseño para algunos accesorios utilizados en sistemas de riego por aspersión**

A continuación se presentan ciertos criterios para el diseño de algunos accesorios que se utilizan en las redes de tuberías de los sistemas de aspersión

#### **Válvulas de aire**

La acumulación de aire en los puntos altos de las tuberías de conducción reduce la sección de paso del agua, aumentando las pérdidas por fricción y reduciendo el gasto. La instalación de puntos de purga de aire en la red de tuberías reduce los gastos de bombeo y los efectos de golpe de ariete. Se utilizan normalmente en las principales en sistemas fijos y semi-fijos y en las tuberías de conducción. Las válvulas de aire permiten evacuar las bolsas de este elemento dentro de la tubería en el momento del llenado, y permite la entrada de aire cuando se produce el desagüe.

Las válvulas de aire (ventosas) se instalan en cada punto alto en la red de tuberías. Para permitir la evacuación del aire, hay que diseñar la pendiente de la línea de tuberías no menor de 0,2%, y con una velocidad del agua no inferior a 0,5 m/s. En sistemas grandes las válvulas de aire no debieran estar distanciadas a más de 200 m en una principal o en las tuberías de conducción.

Las válvulas de aire son de distintos tipos, las cuales cumplen diferentes funciones. Están las válvulas cinética y antivacío, que permiten evacuar grandes cantidades de aire durante el proceso de llenado de la tubería y a su vez permiten el ingreso de aire durante el vaciado de la red. Otro tipo son las válvulas automáticas que permiten la evacuación permanente pequeñas cantidades de aire, que se mantienen en la red en forma de burbujas. Estas válvulas son de funcionamiento continuo que trabajan aún cuando la red este con alta presión. Finalmente están las de doble propósito, que combina la función de las dos anteriores, funciona por lo tanto durante el proceso de llenado (purgado), como del vaciado (antivacío) y a su vez trabaja a tubería llena evacuando pequeñas burbujas de aire que se depositan en los puntos altos.

En el cuadro 14 se presenta el número de válvulas cinética y activación de 2" que se requiere colocar en cada punto crítico para introducir aire en las tuberías, en el proceso de vaciado, en función del diámetro del tubo y la pendiente del terreno

<b>DIAMETRO DE LA TUBERIA</b>								
<b>PENDIENTE</b>	<b>2"</b>	<b>3"</b>	<b>4"</b>	<b>6"</b>	<b>8"</b>	<b>10"</b>	<b>12"</b>	<b>14"</b>
5%	1	1	1	1	1	1	2	3
10%	1	1	1	1	1	2	3	4
15%	1	1	1	1	1	2	3	4
20%	1	1	1	1	2	2	3	5
25%	1	1	1	1	2	3	4	5
30%	1	1	1	1	2	3	4	6
35%	1	1	1	1	2	3	5	6
40%	1	1	1	1	2	3	5	7
45%	1	1	1	1	2	3	5	7
50%	1	1	1	1	2	4	5	8
55%	1	1	1	1	2	4	5	8
60%	1	1	1	1	2	4	6	8

Cuadro 14 Número de ventosas de 2" por necesarias para el vaciado de las tuberías

En el cuadro 15 se presenta la cantidad de ventosas cinéticas de 2", en los diferentes puntos críticos, necesarias para el llenado de tuberías, en función del caudal existente

<b>Nº DE VENTOSAS DE 2"</b>	<b>CAUDAL DE LLENADO (l/seg)</b>
1	Hasta 76 l/seg
2	76-153
3	153-229
4	229-306
5	306-382

Cuadro 15 Número de ventosas necesarias para el llenado

### Tubos Elevadores para Aspersores

Estos son los que conectan los aspersores con la tubería principal, cuyo objetivo es evitar la interferencia del chorro por el follaje del cultivo, como la turbulencia en el movimiento vertical del agua.

La longitud del tubo elevador depende del cultivo y del caudal de descarga de cada aspersor. Los diámetros y longitudes mínimas y recomendables se presentan en el Cuadro 16.

<b>Caudal (l/s)</b>	<b>Longitud (cm)</b>	<b>Diámetro (pulgadas)</b>
0,64	15	3/4
0,64 - 1,58	25	3/4
1,58 - 3,16	30	1
3,16 - 7,60	45	1

Cuadro 16. Longitudes mínimas de los elevadores para aspersores

### Tubo Elevador de la Subprincipal y válvula

El tubo elevador de la principal tiene el papel de distribuir el agua desde la tubería enterrada al lateral porta aspersores, por medio de una válvula. En todos los sistemas portátiles, donde la principal esta en superficie, la distribución hacia las laterales se realiza normalmente con una T de acoplamiento rápido.

En sistemas fijos y semifijos es necesario emplear especial atención en escoger el diámetro del elevador, su método de armado, la válvula y su conexión a la lateral.

El diámetro del elevador se elige en función del caudal, de tal manera que tenga una pérdida de presión reducida. En el cuadro 17 se presenta el diámetro de elevador recomendado para diferentes caudales, y las pérdidas de carga en un largo de 1 m.

A las pérdidas debido al elevador es necesario adicionar la pérdida que produce la válvula. La función de la válvula es la de abrir y cerrar el paso de agua y también regular la presión, existen varios tipos de válvulas, siendo las más utilizadas las de rosca de tipo y, existiendo en el mercado desde 3/4 hasta 3 pulgadas. Las pérdidas de carga de las válvulas están dadas por los fabricantes.

La ubicación de los elevadores a lo largo de una principal enterrada dependerá del espaciamiento de laterales, colocándose espaciamiento por medio, y de tal manera que una válvula cubra tres posiciones de la lateral. Dos que se acoplan directamente a la válvula (una a cada lado) y una tercera, hasta la cual el agua es llevada por una tubería de conducción. En estos casos, es necesario adicionar a las pérdidas de carga de la lateral la pérdida de esta tubería de conexión.

Descarga (m <sup>3</sup> /hr)	Diámetro del elevador en pulgadas		
	1 ½	2	3
5	0.12		
10	0.40	0.30	0.05
15	1.75	0.60	
20	3.10	1.10	0.20
25	5.00	1.65	
30	7.20	2.30	0.40
35	10.00	3.10	
40		4.00	0.70

Cuadro 17. Pérdidas de carga (m/m) en elevadores de diferentes diámetro

### **Otros Accesorios**

Dentro de un equipo de riego por aspersión es necesario utilizar una serie de accesorios menores, tales como codos Tees, reductores, acoples, etc. Para cada uno de estos accesorios se puede determinar las pérdidas de carga, que por su pequeña magnitud se denominan singulares utilizando la ecuación (41). Una forma de estimarlos es

asumirlos como un valor global que se estima del orden del 20% de la pérdidas del total de las pérdidas por fricción en las tuberías.

Si en el sistema se incluyen reguladores de presión, filtros, etc., será necesario utilizar las pérdidas de carga que recomiendan los fabricantes, para los diferentes diámetros y caudales.

A continuación, en el cuadro 18 se presenta la pérdida de carga producida por diferentes accesorios en tuberías de 2, 4 y 8 pulgadas,. La pérdida de carga está expresada como longitud equivalente de tubería del mismo diámetro. Es decir, una válvula de pie de 2" produce la misma pérdida de carga que una tubería de 2" y 5 metros de longitud. La pérdida de carga se calcula aplicando Hazzen -Willians para ese trozo de tubería de la longitud y diámetro indicado, con el caudal que moviliza el equipo de riego

<b>Accesorio diámetro</b>	<b>Válvula de pie</b>	<b>Válvula de retención</b>	<b>Llave de compuerta</b>	<b>Codo de 90°</b>	<b>T de derivación</b>
2"	5	3	3	1	0.75
4"	8	5	2.5	2	1.5
8"	11	7	3	2.9	2.3

Cuadro 18 Pérdida de carga de diferentes accesorios, expresados como longitud equivalente de tubería.

#### Accesorios del Equipo de Bombeo

- Manómetros

Los manómetros son necesarios para indicar y controlar la presión existente en el sistema.

- Medidores de agua

Permite medir y registrar los volúmenes de agua aplicados.

- Válvula de retención

Se instalan a la salida de la impulsión, con el fin de impedir automáticamente el regreso del flujo hacia la bomba cuando esta se detiene o no está trabajando.

- Llave de paso

Sirven para cortar completamente el flujo de agua de la bomba y aislarla del resto del sistema.



## RIEGO POR ASPERSION CON CARROS AUTOPROPULSADOS

corresponden a un sistema de aspersión de desplazamiento continuo, es decir, se aplica agua en movimiento, por medio de un aspersor de gran tamaño (cañón de riego) colocado sobre un carro con ruedas o patín, el cual es arrastrado por una manguera flexible que entrega el agua a presión. La manguera se enrolla automáticamente en un tambor accionado por un flujo de agua a través de un mecanismo de turbina o de fuelle hidráulico. (figura 8). La presión es generada por una bomba centrífuga, la cual puede ser accionada por un motor eléctrico o a combustión interna

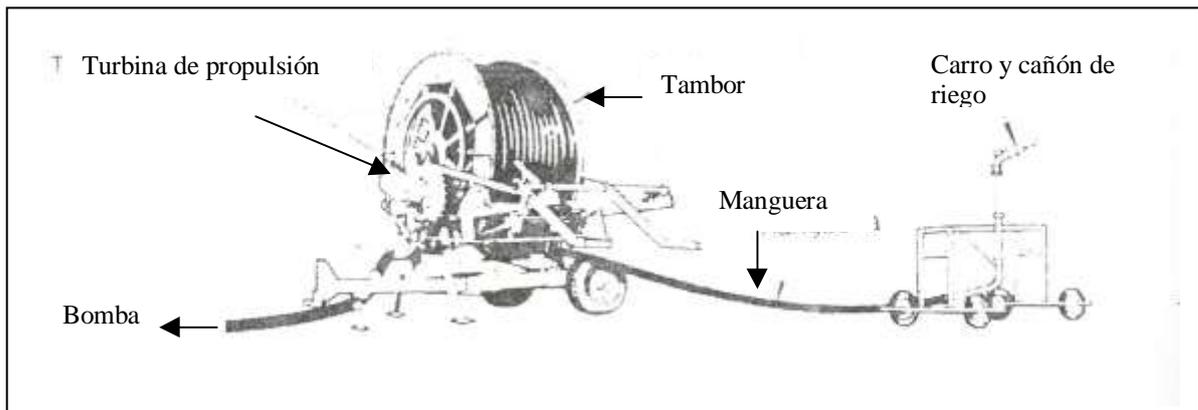


Figura 8 Carro autopropulsado,

El riego se realiza por bandas de un ancho que es función del radio de mojamiento del aspersor (de 60 a 120 m). Para efectuar el riego se desenrolla la manguera tirando del carro porta cañón con ayuda de un tractor hasta situarlo junto al borde del potrero, tras lo cual puede comenzar el riego. La manguera se recoge a una velocidad constante, que depende de la lámina de riego que se quiere aplicar. Una vez enrollada la manguera y finalizado el riego de esa banda, se repite la aplicación en una banda paralela a la anterior o bien se gira la máquina en 180° y se repite la operación, pudiendo regar una nueva franja. Para realizar otro riego más es preciso desplazar la máquina a la distancia adecuada para regar una nueva franja paralela a la primera y que tenga un traslape con ella.

Este tipo de máquina es adecuado para climas húmedos o semihúmedos, donde se necesita de riegos suplementarios, ya que el consumo de energía es muy alto para usarlo en riegos continuos, por lo que significa en costos de operación.

### **Ventajas de los carros autopropulsados o carrete de riego:**

- Este método permite regar una gran variedad de cultivos (maíz, praderas, remolacha, frutales, etc.)
- Son de diseño simple y permiten una buena uniformidad de distribución del agua cuando se opera adecuadamente.
- La gran movilidad del sistema es muy apropiada para explotaciones con potreros pequeños, formas irregulares y dispersas.

- Ocupan reducida cantidad de mano de obra.

### **Limitaciones de los carros autopropulsados o carrete de riego**

- Elevada presión de trabajo (40 – 100 m.c.a.)
- Gran tamaño de gota, que puede erosionar el suelo y dañar la planta, además de ser más afectadas por el viento dada la altura de la trayectoria de las gotas.
- La tasa de aplicación de estos equipos es relativamente alta y los suelos que se riegan con este sistema deben tener velocidades de infiltración elevadas

### **1.- Componentes del carro autopropulsado o carrete de riego:**

- a) **Cañones de riego:** Los cañones son grandes aspersores giratorios, (figura 9) de brazo oscilante o de turbina, contruidos para resistir el elevado caudal de descarga y alta presión de trabajo. Funcionan en forma sectorial, cubriendo sectores de 200 a 220°. De esta forma el cañón se desliza sobre suelo seco. El ángulo del aspersor debe ser de 21 a 23° para tener alcance suficiente y disminuir el efecto del viento. Las boquillas varían entre 12 y 40 mm, con caudales que pueden variar entre 7 y 40 l/s, con presiones entre 40 a 80 m.c.a. (cuadro 18)

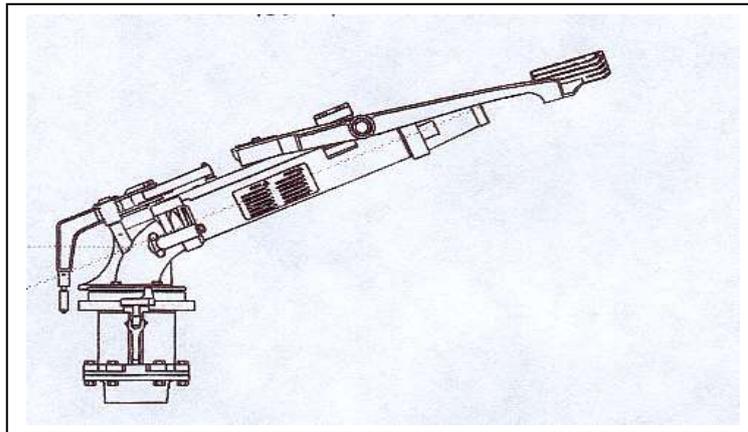


Figura 9 Cañón de riego.

- b) **Manguera:** La tubería que conecta el carro (figura 8) con el cañón de riego es de polietileno de media densidad, capaz de resistir grandes presiones y las fuerzas de tracción generadas por el arrastre sobre el suelo. Además, deben ser lo suficientemente flexible para enrollarse en el tambor. La longitud y el diámetro de las tuberías es variable, dependiendo del caudal a movilizar y del diámetro del tambor enrollador. En cuanto al diámetro puede ir desde 75 mm hasta 125 mm. La longitud puede variar desde 100 hasta 300 m o más.

- c) **Tambor enrollador:** es un tambor metálico de diámetro variable que va girando a una velocidad predeterminada y que enrolla la manguera, con una velocidad de 10 a 60 m/h. La velocidad de enrollado de la manguera determina la magnitud de la lámina de

riego El movimiento del tambor está generado por un fuelle hidráulico o por una turbina. La velocidad de la turbina puede ser modificada a voluntad por el operador del equipo de riego. El funcionamiento de la turbina provoca una pérdida de carga de entre 5 a 10 m.c.a ( 0,5 a 1 bar).

Todas las máquinas disponen de un mecanismo de recogida de la manguera, accionado por la toma de fuerza del tractor para caso de emergencia. Los equipos de gran tamaño van dotados de mecanismos (hidráulico o mecánico) que permiten girar 180° parte de la máquina para poder regar una nueva banda opuesta a la primera. Adicionalmente los carretes grandes cuentan con un compresor que permite el vaciado de la manguera para evacuar el agua y facilitar el traslado de la máquina ( reducción de peso)

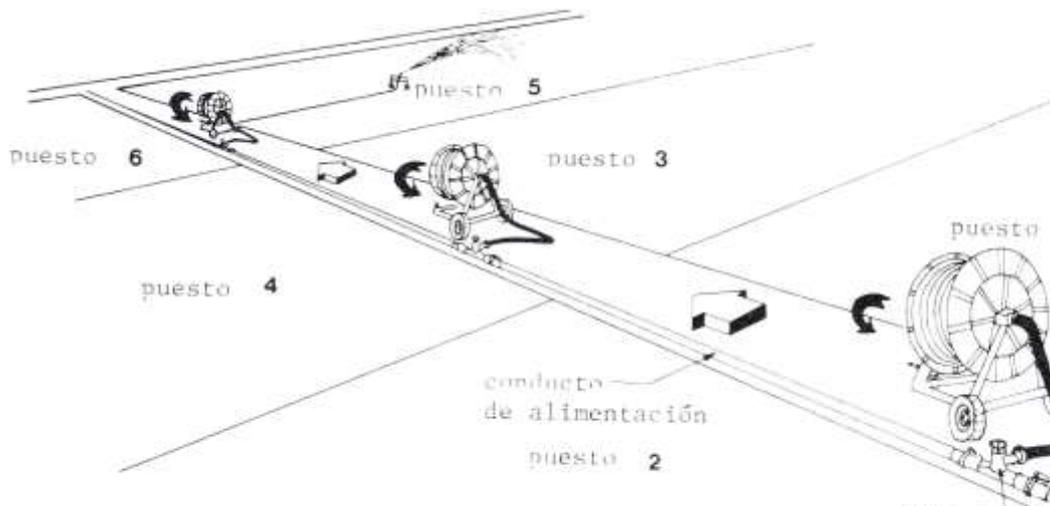


Figura 10. Disposición típica de un riego con carrete.

**d)Motobomba.:** La energía requerida para el funcionamiento de los carros autopropulsados debe ser generada por un equipo motobomba capaz de suplir los requerimientos de presión y caudal. El sistema de bombeo puede ser basado en motores a combustión interna o motores eléctricos. En el caso de motores a explosión (combustión interna), las bombas son de tipo centrífugas, de una o más etapas, que funcionan entre 1400 y 1850 r.p.m., conectada a un motor de alta potencia, de 4 a 6 cilindros. En este caso el consumo de combustible es elevado (0.3 – 0.4 l/Hp/h de operación). En el caso de bombas eléctricas, están funcionan a 2.900 r.p.m, pudiéndose poner en serie, si la bomba individual no genera la presión suficiente

**e)Red matriz:** En muchos casos las bombas extraen el agua directamente de acequias y la impulsan al carro. Hay situaciones, sin embargo donde la fuente de agua se encuentra retirada de los terrenos , por lo cual el agua debe ser impulsada a través de tuberías hasta donde se ubica el carrete. Si la red de tuberías va en superficie son de fierro galvanizado, con uniones de acople rápido e hidrantes (figura 10). Si la tubería va enterrada, son normalmente de PVC , clase 10.

## **2.- Diseño de carros autopropulsados**

Existen en el mercado diferentes tipos, marcas y modelos de máquinas disponibles, por lo cual el diseño consiste en determinar cual es el tipo de máquina y las condiciones de operación que mejor se adecuan a cada condición específica

El diseño de un equipo de riego por aspersión de desplazamiento continuo, como es el carro auto propulsado requiere, al igual que los equipos estacionarios, de un diseño agronómico y de un diseño hidráulico. El diseño agronómico es similar al que se realiza para los riegos estacionarios, incluyendo por lo tanto los siguientes parámetros básicos :

El diseño agronómico corresponde la determinación de:

- Evapotranspiración del cultivo,
- Lámina de riego neta y bruta
- Velocidad de infiltración del suelo
- Frecuencia de riego y superficie mínima de riego diario
- Selección del modelo de aspersor,
- Determinación de caudales requeridos.

El diseño hidráulico corresponde al cálculo de los requerimientos de presión a la entrada de la máquina, que dependerán de la presión de operación del aspersor, pérdidas de carga en la manguera, en la turbina del tambor, diámetros de tuberías de aducción, requeridos para que el sistema funcione cumpliendo ciertos requisitos mínimos establecidos y a la selección del equipo de bombeo, si este fuera necesario.

### **2.1.- Diseño agronómico**

El diseño agronómico del riego por aspersión con carros autopropulsados es muy similar al diseño agronómico utilizado en los sistemas estacionarios. Un punto relevante es el la determinación de la demanda de agua, es decir de la evapotranspiración del cultivo.

En la concepción del diseño es necesario considerar los siguientes puntos:

- a) El sistema se debe diseñar para realizar uno o dos cambios por día como máximo, dejando a los menos 1 hora para hacer el cambio de posición.
- b) Debido a que los márgenes del terreno reciben menos agua que el resto del terreno (aproximadamente 50% menos), el cañón se debe dejar un poco más de tiempo en esta posición, pero tratando de minimizar las pérdidas de agua. Generalmente se recomienda comenzar y terminar el riego cuando las 2/3 partes del radio de mojado del aspersor estén dentro del margen del terreno.
- c) Los cañones deben transitar en el mismo sentido que las hileras de los cultivos; se recomienda regar perpendicular a la pendiente del terreno.
- d) Debido a que la intensidad de precipitación de estos sistemas es alta, se recomienda que en suelos de permeabilidad baja se aumente el número de cañones y se reduzca el gasto por cañón. ( usar más de un carro para regar la misma superficie) Los

aspersores de los cañones pueden tener intensidades de precipitación de 7.5 a 15 mm/h para gastos de 20 a 60 l/segundo. En todo caso es necesario considerar que como el sistema es de desplazamiento continuo y se riega con baja frecuencia, gran parte del proceso de infiltración se produce en la parte alta de la curva de velocidad de infiltración., lo cual reduce el potencial de escurrimiento superficial. Por lo tanto si se dispone de información de velocidad de infiltración, se debe usar esta información. Si no se dispone de ella se puede recurrir a las "familias de curvas de velocidad de infiltración" desarrolladas por el USDA y que se presentan en anexos.

- e) Fijar el ancho del espaciamiento entre franjas de riego, considerando un entre los radios de mojado de los aspersores .

- **Antecedentes básicos**

Los antecedentes básicos que se requieren son muy similares a los utilizados en el diseño de sistemas estacionarios, a saber :

- a) Evapotranspiración del cultivo en el mes de máxima demanda (Etm)
- b) Lámina de riego neta
- c) Lámina de riego bruta
- d) Frecuencia de riego
- e) Superficie mínima de riego diario
- f) Curva de velocidad de infiltración del suelo ( si está disponible)
- g) Superficie total de riego

- **Capacidad del equipo de riego**

Los elementos básicos para definir la capacidad del equipo de riego (l/s) es la superficie que se quiere regar, de evapotranspiración máxima (Etm), la eficiencia de aplicación del agua de riego ( normalmente 75%), las horas máximas de operación del equipo al día y el número de días a la semana que se va a regar.

Con este procedimiento se determina la lámina de riego neta ( relación 5) y la lámina de riego bruta ( relación 5 a). A partir de la lamina de riego neta y la Etm, se determina la frecuencia de riego ( relación 6). Con la frecuencia de riego y la superficie total a regar, se determina la superficie de riego diaria, SMR, en hectáreas ( relación 7). A partir de la SMR, de la lámina bruta, en mm y de la las horas reales de riego cada día, en horas, se determina el caudal del equipo de riego, de acuerdo a la siguiente relación

$Q \text{ (l/s)} = \frac{\text{SMR} * \text{Lb} * 2,77}{\text{To}} \quad (49)$
--

Donde :

SMR =es la superficie mínima de riego diario (hás)

Lb = Lámina bruta (mm)

To = tiempo de operación al día ( horas)

2,77 factor de cambio de unidades

Otra forma de definir la capacidad del equipo definir es a partir de la demanda diaria, corregida por las horas de operación al día y por el número de días de la semana que operará el equipo, obteniéndose de esta forma el caudal instantáneo ( $q_i$ ) requerido para regar una hectárea. Este valor se multiplica por la superficie a regar.

$$q_i = 2,77 * (E_{tm}/E_{fa}) * (1/T_o) * (7/6)$$

$$Q_t = q_i * A \quad (50)$$

$q_i = l/s/há$

$E_{tm}$  evapotranspiración máxima demanda (mm/día)

$E_{fa}$  = eficiencia de aplicación (en fracción 0,75)

$T_o$  = tiempo de operación al día ( horas)

(7/6) relación entre los día de la semana y los días de trabajo

2,77 factor de cambio de unidades

- **Selección del aspersor**

Las características que se deben considerar para seleccionar el aspersor son: presión de operación, ángulo de trayectoria del chorro y tamaño de la boquilla del aspersor. Estas características dependen de la infiltración del suelo, del espaciamiento entre posiciones de riego, de las condiciones del viento y del cultivo.

Angulo de inclinación del aspersor

El ángulo de inclinación del aspersor varía entre 18 y 32°, para seleccionarlo se debe considerar la inclinación óptima para aumentar la cobertura de mojado y disminuir el impacto de las gotas sobre el suelo. En el caso de que se presenten vientos con velocidades mayores a 16 km/h, se recomienda utilizar ángulos pequeños para producir una buena cobertura de mojado. Cuando la velocidad media del viento varía entre 2.7 y 4.2 m/s, se recomienda utilizar aspersores con ángulos de trayectoria entre 23 y 25°. A manera de ejemplo en el cuadro 18 se presentan los gastos y diámetros típicos de un aspersor con un ángulo de 24°,

Presión por aspersor mca	Diámetro de la boquilla, (mm)									
	20.3		25.4		30.4		35.6		40.6	
	Gasto y diámetro del aspersor									
	l/s	m	l/s	m	l/s	m	l/s	m	l/s	m
42.0	9.0	86.9	14.2	99.1	20.8	111.3	---	---	---	---
49.0	9.8	91.4	18.9	103.6	22.4	115.8	30.3	132.6	---	---
56.0	10.4	94.5	19.6	108.2	24.0	120.4	32.5	138.7	42.6	146.3
63.0	11.0	97.5	20.2	111.3	25.6	125.0	34.4	143.3	45.1	150.9
70.0	11.7	100.6	20.8	114.3	26.8	125.0	36.3	146.3	47.6	155.4
77.0	12.3	103.6	21.5	117.3	28.1	131.1	38.2	149.4	49.8	158.5
84.0	12.9	106.7	22.1	120.4	29.3	134.1	39.8	152.4	52.1	163.1

Cuadro 18 Gastos típicos y diámetros de mojado para cañones con un ángulo de 24°,

### Boquilla del aspersor

Existen dos tipos de boquilla, la telescópica y la de orificio. La boquilla telescópica produce un chorro compacto y un mayor diámetro de mojado, lo que permite un espaciamiento grande entre franjas de riego. La boquilla de orificio produce gotas más pequeñas, lo que es adecuado para el riego de cultivos frágiles.

Un criterio para seleccionar el aspersor es conocer las características de infiltración del suelo. Es necesario tener presente, sin embargo, que dado que se trata de un equipo de desplazamiento continuo, de baja frecuencia de riego, no necesariamente la velocidad de infiltración estabilizada puede ser limitante para la selección del aspersor, ya que gran parte de la aplicación de agua se puede producir en la parte alta de la curva de velocidad de infiltración. Idealmente se requiere contar con la curva de velocidad de infiltración del terreno a regar

. La tasa de aplicación del aspersor se puede calcular como sigue :  
La fórmula es la siguiente:

$$I_{pp} = \frac{q_c \text{ (l/s)}}{0,785 (D)^2} * 3.600 * (\omega_c / 360) \quad (51)$$

Donde:  $I_{pp}$  es intensidad de precipitación media del cañón ( mm/hr)

$q_c$  es el gasto del cañón, (l/s):

$D$  es diámetro de mojado (m) el radio efectivo de mojado del aspersor

$\omega_c$  es el sector del círculo que recibe el agua, (grados).

- **Espaciamiento entre líneas de recorrido del cañón**

El riego mediante carretes se realiza en franjas paralelas El espaciamiento entre cada franja determinará la uniformidad de aplicación del cañón. El espaciamiento entre pasadas del cañón depende de la velocidad del viento del diámetro de mojado del cañón seleccionado. Para cañones con ángulos de trayectoria entre 23 y 25°, se recomienda multiplicar el diámetro nominal de mojado del aspersor por el factor proporcionado en el cuadro 19.

Velocidad del viento (m/s)	>4.5	2.2-4.5	0.9-2.2	0-0.9
Factor	0.50 a 0.55	0.55 a 0.60	0.65 a 0.87	0.8

Cuadro19 Factor de ajuste del diámetro de mojado para diferentes velocidades

- **Velocidad de avance del cañón:**

En los equipo de desplazamiento la lámina de riego que se aplique depende de del caudal del cañón y de la velocidad de desplazamiento del cañón, es decir de la velocidad de enrollamiento de la manguera en el carrete  
La velocidad de avance del cañón se calcula como

$$V_c = \frac{q_a}{E_r * L_b} * 3600 \quad (52)$$

Donde:  $V_c$  Velocidad de avance del aspersor (m/hr)

$E_r$  es el espaciamento entre líneas de recorrido del cañón [m].

$L_b$  Lámina bruta (mm)

$Q_c$ = caudal del cañon en l/s

El recorrido del cañón está limitado por la longitud de la manguera, por lo tanto el tiempo de recorrido ( $T_r$ ) se calcula con la siguiente expresión:

$$T_r = \frac{L_r}{V_c} \quad (53)$$

donde:  $L_r$  es la longitud de la manguera [m];  $V_c$  es la velocidad de avance del cañón (m/hr).

- **Selección de la manguera**

Debido a que la fuerza requerida para arrastrar la manguera es proporcional al cuadrado de su diámetro, normalmente se utilizan mangueras pequeñas que conduzcan gastos grandes. Sin embargo no se recomienda que las pérdidas de carga al interior de la manguera superen los 13 a 17 m.c.a. La velocidad del agua dentro de la manguera es del orden de los 3 a 4 m/s.

En el cuadro 20 a manera de ejemplo se presenta la pérdida de carga dentro de la manguera, para diferentes caudales y diámetros. El cálculo de las pérdidas de carga se realiza utilizando las ecuaciones de pérdidas de carga , ya sea la de Darcy-Weisbach o la ecuación de Hazzen-Williams, con un valor de  $C$  de 150

Gasto (l/s)	Diámetro nominal de la manguera, mm				
	63	75	90	110	125
	Pérdida por fricción m/100 m				
6.3	7,2	3,4			
9.5	15,0	7,3	2,7		
12.6	25,0	12,0	4,5		
15.8		18,0	6,8	2,5	
18.9		26,0	9,5	3,6	
25.2			16,0	6,0	3,2
31.5			24,0	9,7	4,8
34.5				10,83	5,7
37.9				12,8	6,7
44.2				17,0	8,9
50.5					11,4
68.8					20,0

Cuadro 20 Pérdidas por fricción en mangueras de PE de distintos diámetros (m/100m) estimada mediante la ecuación de Darcy-Weisbach

- **Presión a la entrada del carrete**

La presión a la entrada de la máquina (carrete), corresponde a la presión de operación del cañón, más las pérdidas por conducción en la manguera, más las pérdidas de presión que se producen en la turbina que hace funcionar el mecanismo de giro del tambor . Esta última pérdida es de entre 5 a 10 m.c.a

- **Tubería principal**

En algunos casos se requiere contar con una tubería principal de aducción que permitan llevar el agua desde el punto de bombeo hasta la posición que se encuentra la máquina. Si las tuberías van en superficie, normalmente se ocupa fierro galvanizado con acople rápido ( figura 10) , si van enterrada normalmente son de PVC. Las pérdidas de carga en las tuberías con acople rápido se calculan con la fórmula de Scobey y en las de PVC con la de Hazzen -Williams.

Para el cálculo de la tubería principal se deben tomar en cuenta las mismas consideraciones indicadas en el caso de los equipos estacionarios, en relación a las pérdidas máximas y velocidades del agua al interior de los tubos. En lo posible esta última no debe superar 1 m/s, con el objeto de evitar un excesivo golpe de ariete

Cuando existe este tipo de tuberías es necesario calcular su clase y colocar válvulas de aire.

- **Selección de la bomba**

Para seleccionar la bomba se debe considerar el caudal requerido y la carga dinámica total, la cual incluye los requerimientos de presión a la entrada del carrete y las pérdidas de carga por fricción y singulares tanto en la succión de la bomba, como en la tubería de aducción, si esta última corresponde.

Por lo general este tipo de equipos se utilizan bombas centrífugas de 1 a dos etapas, con motores de combustión interna girando a 1.400 a 1.850 rpm, con motores de 4 a 6 cilindros. El conjunto motobomba se emplaza en un chasis con ruedas, por lo que puede ser movilizadado a distintos lugares.

Los motores pueden ser refrigerados por aire o refrigerados por agua, esto último normalmente se utiliza con motores sobre 25 HP. Dada la potencia que requieren los motores, estos en su mayoría son petroleros (Diesel)

Para determinar la potencia requerida por la bomba se puede utilizar la relación (42), considerando la eficiencia de la bomba y la eficiencia del motor, de acuerdo a la información proporcionada por los fabricantes.

Sin embargo es más recomendable hacer una selección a partir de las curvas características de las bombas y de los motores.

En relación a los motores a explosión, los fabricantes entregan curvas que relacionan la potencia generada con las r.p.m a los cuales funciona el motor. Las rpm es variable, dado que depende de la aceleración que se le aplique. En algunos casos la curva de potencia entregada corresponde a la curva "de potencia efectiva", la cual corresponde a la medida en un banco de prueba, con los motores sin accesorios. El uso de accesorios disminuye la potencia generada entre 5 a 10%. Por otra parte hay que considerar reducciones de potencia debido al funcionamiento continuo del motor, que alcanza entre un 15 a 20% Por lo cual será necesario disminuir el rendimiento del motor entregado por la curva de "potencia efectiva" en un 20 a30% En consecuencia la eficiencia de los motores es del orden del 70 a 80%.

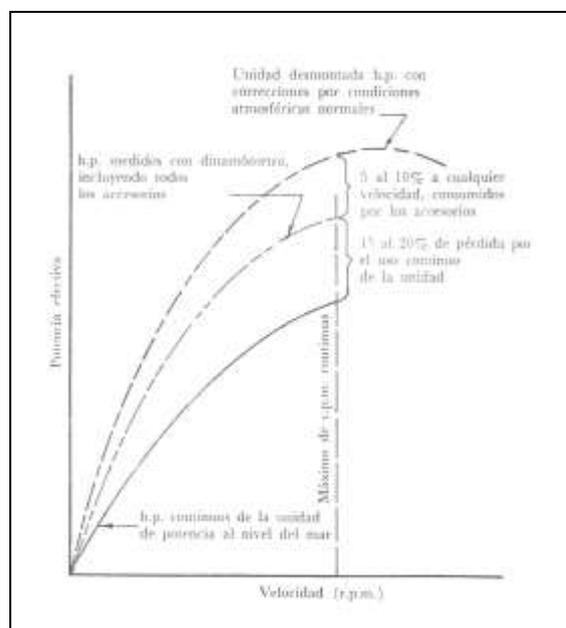


Figura 11 Curva de de potencia en un motor de combustión interna, en función de las rpm. La curva superior es la de potencia efectiva. La curva inferior corresponde a producción de potencia en marcha continua

Se considera que los motores a explosión debieran tener un margen de sobredimensionamiento del orden del 20 a 25%

En otros casos (figura 11) se entregan las curvas correspondientes a la "curva de potencia efectiva", la curva "con los accesorios" y una tercera curva, la inferior "de funcionamiento continuo", esta última curva es la que se elige. Esta curva ya ha tomado en cuenta las pérdidas indicadas en el párrafo anterior.

Finalmente la temperatura y la altitud afectan la potencia de los motores. Las pruebas de laboratorio se calculan al nivel del mar a una temperatura de 15,5°C, por lo cual hay que incluir correcciones debido a este hecho, de acuerdo a la siguiente norma:

- Reducir el grado de carga continua en un 1% por cada 100 m de altitud
- Reducir el grado de carga continuo en un 0,18% por cada grado sobre 15,5°C.

También es posible utilizar bombas centrífugas eléctricas, funcionando a 2.900 rpm, también de una o más etapas o bien colocando bombas en serie si los requerimientos de presión lo exigen.

### Ejemplo

Diseñar un sistema de riego con carrete para un campo de 32 ha, con dimensiones de 800 m de longitud y 400 m de ancho ( ver figura 12), dada la siguiente información. Se requiere incluir una tubería de aducción enterrada desde la fuente de agua hasta la última posición del carrete. El terreno es plano en sentido transversal. Sin embargo la fuente de agua esta en una cota 8 m más baja que el último hidrante.

- Caudal disponible en el predio 40 l/s.
- Etm : 5 mm/día
- Suelo franco arenoso (Vib 14 a 18 mm/hr, cuadro 4)
- $L_n = 26$  mm
- Efa 75%
- Velocidad de viento 4 m/s
- Tiempo de operación máximo al día 20 horas ( $T_o$ )
- Se trabajan 6 días a la semana

A partir de los antecedentes anteriores se puede calcular

- $L_b = 34.7$  mm (  $L_n/0,75$ )
- $Fr = 5,2$  días ( relación 6)
- $SMR = 7,18$  hás ( relación 7)

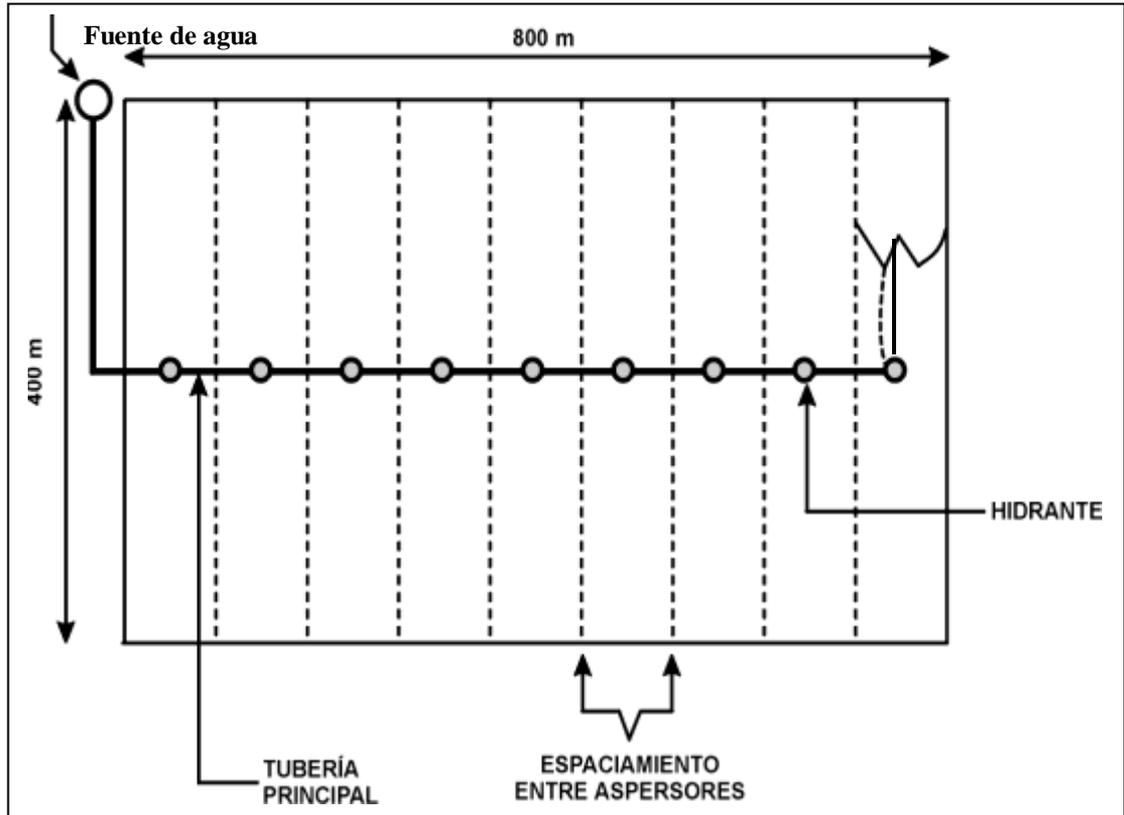


Figura 12 esquema del predio a regar

- Capacidad del equipo

La capacidad del equipo se puede calcular utilizando la relación (49) o (50)

Utilizando la relación (50).

Caudal instantáneo ( $q_i$ ) es de  $2,77 * (5/0,75) * (1/20) * (7/6) = 1,08 \text{ l/s/há}$

Caudal del equipo =  $32 \text{ há} * 1,08 \text{ l/s/há} = 34,5 \text{ l/s}$

Según el criterio del diseñador y los costos de los equipos, se podrá regar con un carrete que aporte 34,5 l/s o con dos unidades de la mitad de caudal cada una (17,25 l/s). Esta última solución generalmente resulta de mayor costo

En lo que resta de este ejemplo se utilizará solo un aspersor de 34,5 l/s

- Selección del aspersor

Si seleccionamos un solo cañón para regar las 32 ha, el gasto de cañón es de 34,5 L/s. El aspersor seleccionado de acuerdo con el cuadro 18 para un gasto de 34,5 L/s, tiene un diámetro en la boquilla de 35.6 mm, un diámetro de mojado de 144 m, y opera con una presión de operación de 65 mca.

- Intensidad de precipitación del cañón

Con los datos de gasto ( $Q = 34,5 \text{ L/s}$ ), mojado de 144 m y sector del círculo de mojado de  $270^\circ$  ( $\omega_c = 270$ ), de acuerdo relación (51), la velocidad de aplicación del aspersor es igual a 10,17 mm/hora.

De acuerdo con la el cuadro 8, para un suelo franco-arenoso la velocidad de infiltración básica (Vib) es de entre 14 a 18 mm/hora. La intensidad de precipitación es menor que la Vib. Sin embargo es necesario recordar que se trata de un equipo de desplazamiento continuo, por lo cual la Ipp del equipo puede ser más alta que la Vib, como ya se ha indicado, ya que gran parte de la infiltración se produce en la parte alta de la curva. E

En anexo se entregan curvas de velocidad de infiltración para suelos de distintas clases texturales, proporcionadas por el USDA..

- Espaciamientos entre líneas de recorridos del cañón:

Para velocidades de viento de 4 m/s se recomienda traslapar los diámetros de mojado, multiplicando el diámetro nominal proporcionado por el fabricante, por el factor de 0.6 (cuadro 19). El espaciamiento recorridos, que resulta de los traslapes de los aspersores, es de 86,4 m ( $144 * 0.6 = 86.4$ ).

Dado que en el sentido de marcha del cañón el campo tiene 800 m, el número de franjas a regar será de 9,25. ( $800/86.4$ ). Redondeando a 9 franjas, la distancia entre una pasada y será de 89 m (61%)

- Velocidad de avance del cañón

La velocidad del cañón viajero se calcula de acuerdo con la relación (52), con  $q_c=34,5 \text{ l/s}$ ,  $E_r = 89 \text{ m}$  y  $L_b = 34,7 \text{ mm}$ , resultando 40,21 m/h.

Suponiendo que el largo de la manguera es de 200 m ( la aducción se ubica al centro del campo), el tiempo de enrollado ( relación 53) es de 4,97 horas.

Considerando 20 horas diarias de riego efectivo, la máquina se puede cambiar de posición 4 veces ( $20/4.97$ ), considerando 1 hora como máximo por cambio de posición, lo que es una situación holgada.

Si en términos simples, se considera un recorrido de 200 m y un ancho de 89, en una postura el aspersor riega 1,78 hás ( $200*89$ ). (En la práctica riega un poco más dado el alcance del cañón de , 72 m de radio)

En un día se riegan 7,12 hás , equivalente a la SMR (7,18 hás/día)

- Pérdida de carga en la manguera.

Se seleccionó una manguera de 125 mm, la pérdida de carga por fricción en 100 m de manguera para un gasto de 34,5 L/s, (cuadro 20) es de 5,7 m/100 m, por lo tanto en la manguera de 200 m de longitud la pérdida es de 11,4 m.c.a metros.

- Presión requerida a la entrada del carrete

La presión requerida a la entrada del carrete corresponde a la presión de operación del aspersor (65 m.c.a), la pérdida por fricción en la manguera (11 m.c.a) y la pérdida en la turbina (10 m.c.a)

La presión requerida a la entrada del carrete es de 86 m.c.a

- Pérdidas de carga en la tubería principal

Se considera una tubería principal de PVC enterrada, con hidrantes de salida cada 89 m, y un largo total de 955 m. Para calcular la tubería principal se utilizará la ecuación de Hazzen - Williams (C 150), tomando en cuenta las limitaciones de velocidad y la magnitud del golpe de ariete. Dada la presión requerida a la entrada de la máquina la tubería principal debe ser a lo menos clase 10.( resistencia a una presión de 100 m.c.a)

En el cuadro siguiente se presenta la pérdida por fricción (m/m), la velocidad del agua en la tubería, la magnitud del golpe de ariete y la pérdida total en los 955 m, para tuberías clase 10 de diferentes diámetros..

Qi (l/s)	De (mm)	Di (mm)	Hf (m/m)	V(m/s)	G.A (m.c.a)	Pf total (m.c.a)
34,5	110	99,4	0,15	4,45	107,20	145,04
34,5	125	113	0,08	3,44	82,95	77,68
34,5	140	126,6	0,04	2,74	66,08	44,67
34,5	160	144,6	0,02	2,10	50,66	23,38
34,5	200	180,8	0,01	1,34	32,40	7,88
34,5	250	226,2	0,00	0,86	20,70	2,65

De acuerdo a estos antecedentes la tubería que más se adecua corresponde a una de 200 o 250 mm, clase 10., como se demuestra en el párrafo siguiente.

En la tubería de 200 mm la presión dinámica requerida a la salida de la bomba es la suma de la presión requerida a la entrada del carrete (86 m.c.a), más las pérdidas por fricción (7,88 m.c.a), más las variaciones topográficas ( 8 m), por lo tanto la presión es 101,9 m.c.a. La presión estática (8 m) más el golpe de ariete en ese mismo punto es de 40,4 m( 8+32.4). En consecuencia la tubería es clase 10.

La conexión al carrete se realizará mediante un hidrante de 5" ( longitud de la tubería elevadora 0,8 m)

- Requerimientos de impulsión

Para determinar los requerimientos de impulsión es necesario determinar la carga dinámica total

Las pérdidas singulares se consideran como un 20% de las pérdidas de fricción en la tubería principal (1,6 m.c.a)

Componente	Presión (m.c.a)
Altura dinámica de impulsión	
Presión de operación	63
Pérdida en la manguera de carrete	11,4
Pérdida en el carro(turbina)	10
<b>Subtotal entrada del carro</b>	<b>84</b>
Pérdida en la tubería principal	7,88
Diferencias topográficas	8
Pérdida en el hidrante de 5"	1
Pérdidas singulares	1,6
Pérdida válvula de retención 5"	0,6
<b>Total altura dinámica de impulsión</b>	<b>103.08</b>
Altura dinámica de succión	
Altura de succión	2
Pérdida en el chupador y válvula de pie 6"	1
<b>Total altura dinámica de succión</b>	<b>3</b>
<b>Carga dinámica total (CDT)</b>	<b>106.08</b>

Se requiere de una bomba capaz de elevar un caudal de 34,5 l/s, a una CDT de 107 m.c.a

Se seleccionará un equipo de bombeo con motor diesel funcionando a 1.750 rpm.

La eficiencia de la bomba es de 65%.

El equipo se encuentra a 300 m de altitud y la temperatura media del mes de máxima demanda es de 25°C.

Las correcciones por pérdidas en el motor son :

Operación continua	20,0%
Accesorios	5,0%
Altitud (1% cada 100 m)	3,0. %
<u>Temperatura (0,18% por grado sobre 15,5°C)</u>	<u>1,7%</u>
Pérdidas totales	29,7%

$$\text{Eficiencia del motor} = (100 - 29,7\%) = 70,3\%$$

En consecuencia se requiere un motor que genere, a 1750 rpm, una potencia de (relación 42) :

$$H_p = \frac{34,5 * 107}{75 * 0,75 * 0,703} \cong 94 \text{ HP}$$

Lo correcto sin embargo es seleccionar las bombas y los motores a partir de catálogos proporcionado por los fabricantes.(figura 13) La bomba corresponde a una Caprari - MEC-MG, a 1750 rpm

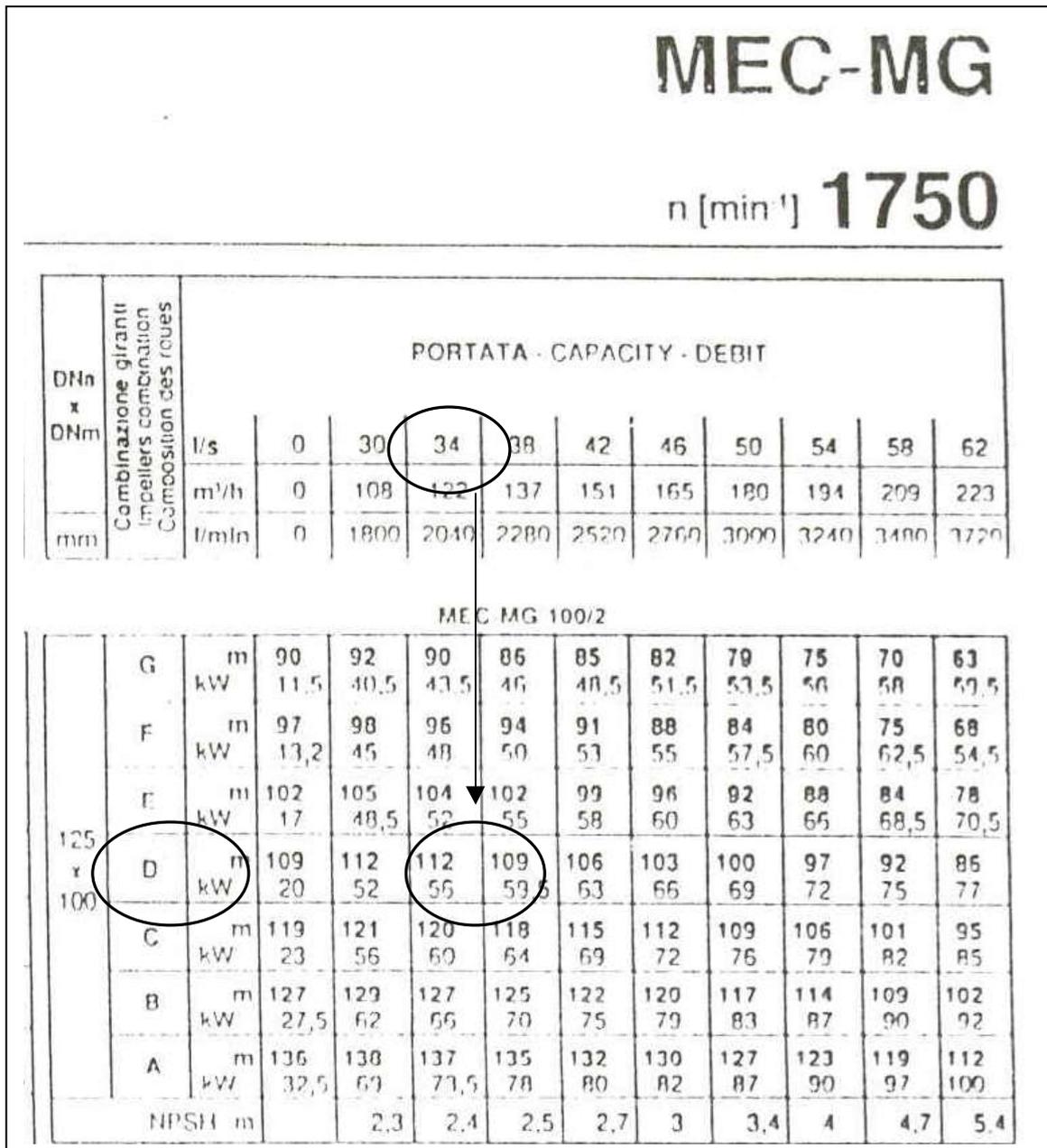


Figura 13 Curva característica de bomba a 1750 rpm

El trabajo requerido, (34,5 l/s y 107 m.c.a) lo realiza una bomba modelo 100 MEG-MG 100/2, con rodete D, que consume una potencia de 57 Kw, equivalentes a 76,5 HP. (1HP = 0,75 Kw). El NSPH de la bomba es de 2.4 m.

Para tener la potencia continua del motor, se requiere adicionar las pérdidas de potencia que sufren los motores por altura y temperatura. De acuerdo a las condiciones del ejemplo estos dos componentes suman 4,7%, por lo tanto el motor debe generar una potencia de a lo menos 80 HP ( 76.5/(1-0.047), a 1750 rpm. A continuación en la figura 14 se presenta la curva de potencia de un motor a explosión de 6 cilindros.

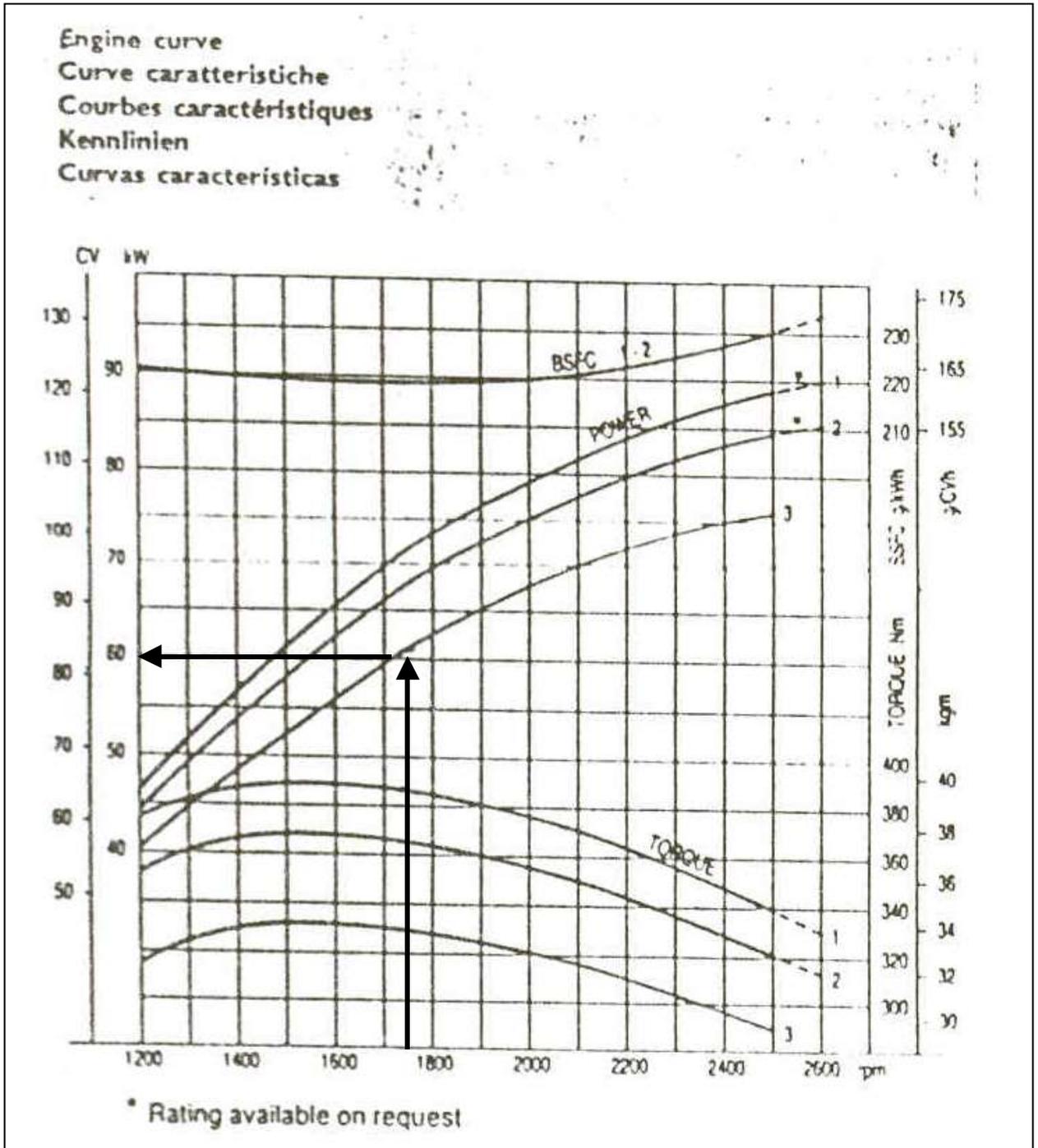


Figura 14 Curva característica de un motor a explosión. La curva 3 corresponde a la curva de potencia de funcionamiento continuo.

A 1750 rpm, el motor es capaz de generar una potencia continua de 60Kw, que corresponden a 80HP

## **RIEGO POR ASPERSION CON PIVOTE CENTRAL**

### **Generalidades**

Este sistema de riego consiste en una lateral, con aspersores, que se mueve en círculo alrededor de un punto fijo que lo alimenta de agua. La tubería de la lateral es soportada por torres metálicas, movidas por ruedas autopropulsadas mediante un motor eléctrico (o hidráulico). Cada torre esta , espaciada entre 30 y 60 m, constituyendo un tramo. En cada torre hay acoples flexibles que conectan tuberías de dos tramos adyacentes. El largo máximo de los tramos es función del tamaño de la tubería, su espesor, pendiente y topografía del terreno. El largo de los tramos no tiene porque ser uniforme y generalmente varía para adecuarse a las dimensiones del campo o para ajustar la altura de los aspersores en terreno ondulados. La longitud más común de los pivotes es 400 m y su vida útil es de 15 a 20 años.

El sistema de pivote central presenta ventajas e inconvenientes

### **Ventajas:**

- Debido a que las dosis de riego es únicamente función de la velocidad de rotación, puede adaptarse tanto a dosis grandes como pequeñas.
- El poder modificar la pluviometría permite al sistema adaptarse a distintos tipos de suelos.
- El sistema permite realizar riegos de alta uniformidad.
- No necesita nivelación de suelos, adaptándose a topografías onduladas. Esto permite conservar la fertilidad natural del suelo.
- Evita la construcción de acequias y canales, aumentando la superficie útil.
- Puede conseguir altos grados de automatización, con el consiguiente ahorro de mano de obra.
- Posee un bajo costo de inversión por hectárea.
- Bajos costos de operación.
- El sistema trabaja a bajas presiones permitiendo menores requerimientos de energía.
- Permite una rotación de cultivos, con la condición de que el dimensionamiento se realice para el cultivo más exigente.
- Permite la aplicación de químicos junto con el agua de riego.

### **Desventajas:**

- Alta inversión inicial.
- Requiere a un servicio técnico especializado.
- Se necesitan adaptar los predios para su funcionamiento (mover cercos, realizar nuevos trazados de líneas eléctricas, eliminar árboles, modificar caminos, etc.)
- Al ser un sistema de riego circular se pueden perder las superficies en las esquinas de los predios.
- Para un buen manejo del riego y la presencia de varios cultivos bajo el pivote, el sistema obliga a cultivar en sectores circulares.
- La uniformidad de riego se ve afectada por la influencia de fuertes vientos.

- Requiere de sistemas de decantación y filtraje cuando se presentan problemas con la calidad del agua.

En general los sistemas de Pivote Central no se recomiendan para predios de superficies inferiores a 30 ha o de formas muy irregulares, pero la decisión final del sistema debe realizarse después de analizar económicamente los beneficios y costos del proyecto. Es necesario indicar que recientemente han hecho su aparición al mercado minipivotes, que permiten regar superficies inferiores a 30 has a precios razonables

## 1.- Componentes de un sistema de pivote central

### Punto pivote

El punto de pivote es una estructura base en el centro del campo regado, en torno al cual gira la máquina. La estructura base de pivote es también la que permite el ingreso del agua y de la potencia eléctrica que hace funcionar la máquina (figura 15). En el punto pivote esta instalado el tablero de control, que regula la operación del equipo. Las estructuras base son generalmente permanentes o fijas en sistemas grandes, pero pueden ser trasladables en sistemas más pequeños, de manera que con un mismo pivote se pueden regar áreas ubicadas en distintos lugares (pivote móvil)

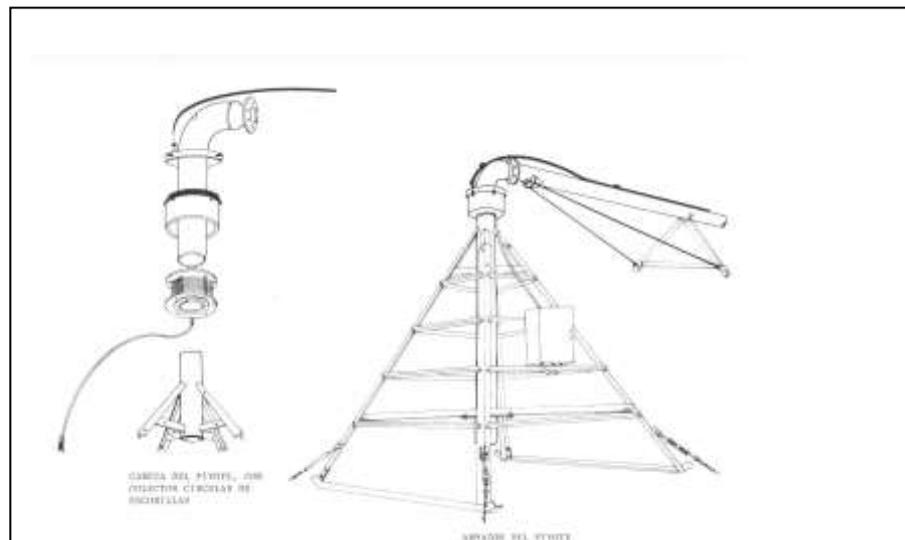


Figura15 Esquema del centro del pivote o punto pivote

### Tramos

Los tramos están constituidos por un segmento de la tubería lateral y las torres que lo limitan. La longitud de cada tramo varía entre 30 y 60 m. La tubería es de acero galvanizado, de diámetro variable, entre 135 a 250 mm, dependiendo del caudal a conducir. Las tuberías son soportadas por cables que se apoyan en las torres (figura 16). Cada cierta distancia en la lateral se ubican los aspersores.

Las torres son de estructura metálica de altura variable entre 3 a 5 m, apoyadas sobre ruedas de tracción que permiten el movimiento del pivote. Las ruedas de cada torres son accionadas por un motor eléctrico de alrededor de 1 HP (0,75 Kw) para permitir su movimiento en forma autónoma. También usan motores hidráulicos que son mas caros. En la parte superior de cada torre hay sensores que les permiten avanzar o parar de manera que se mantengan siempre alineadas. Generalmente la primera torre tiene un cronómetro adicional que, detiene el sistema cuando hay problemas de alineamiento. La última torre es la que dirige a las demás. Los cables eléctricos que alimentan los sensores y transmiten información, o las líneas hidráulicas, van colocadas longitudinalmente a la tubería lateral.

Al final de la lateral va el voladizo (figura 16), que es una tubería de menor diámetro, con aspersores, suspendida por cables al final de la última torre para aumentar el área regada, cuya longitud máxima alcanza a 25 m. Cañones y sistemas de esquinas pueden ser colocados al final del equipo para aumentar el radio mojado

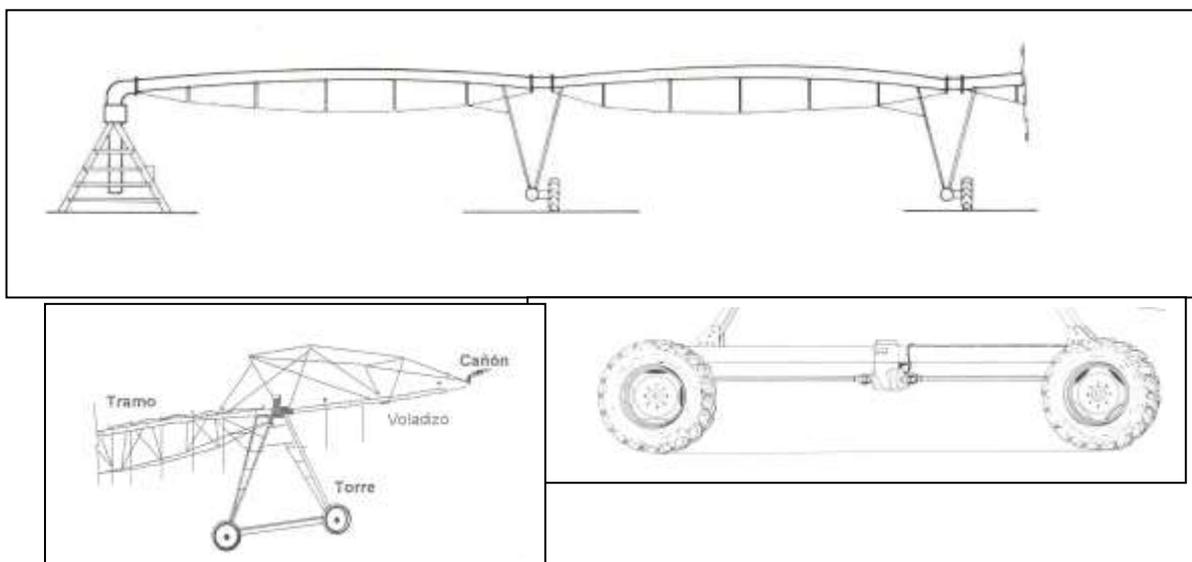


Figura 16 Representación e de los tramos de un pivote (figura superior), y detalle del motor que impulsa las ruedas impulsoras (abajo derecha) y el voladizo, con un cañón final ( abajo izquierda)

### Aspersores

Los dos tipos de aspersores usados en Pivote centrales son de impacto y spray (Figura 17). Los de impacto son generalmente de baja a media presión y bajo ángulo y van montados directamente sobre la tubería lateral del Pivote. Los tipo spray son montados en una tubería bajante flexible, conectada en forma de U a la parte superior de la tubería lateral, manteniendo los emisores sobre la canopia del cultivo. La altura puede ser modificada según el crecimiento del cultivo. La localización, espaciamento, tamaño y descarga de cada aspersor es especificado por el fabricante. Los aspersores tipo spray de baja presión son los más comúnmente utilizados para reducir las pérdidas por viento y evaporación. Este tipo de aspersores lleva un regulador de presión o controles de flujo ubicados junto al emisor para mantener la uniformidad a lo largo de la línea. Uso de aspersores de impacto de alta presión es raro

Las máquinas modernas tienen espaciamiento uniforme de aspersores que varían entre 2 a 3 m, dependiendo del fabricante. Cerca del centro, donde el avance es lento, puede ocurrir que no todas las salidas tengan un aspersor instalado, con el fin de reducir la aplicación de agua. Después de la primera torre todas las salidas tienen su aspersor. El traslape de los aspersores es de in 100% a 400%.

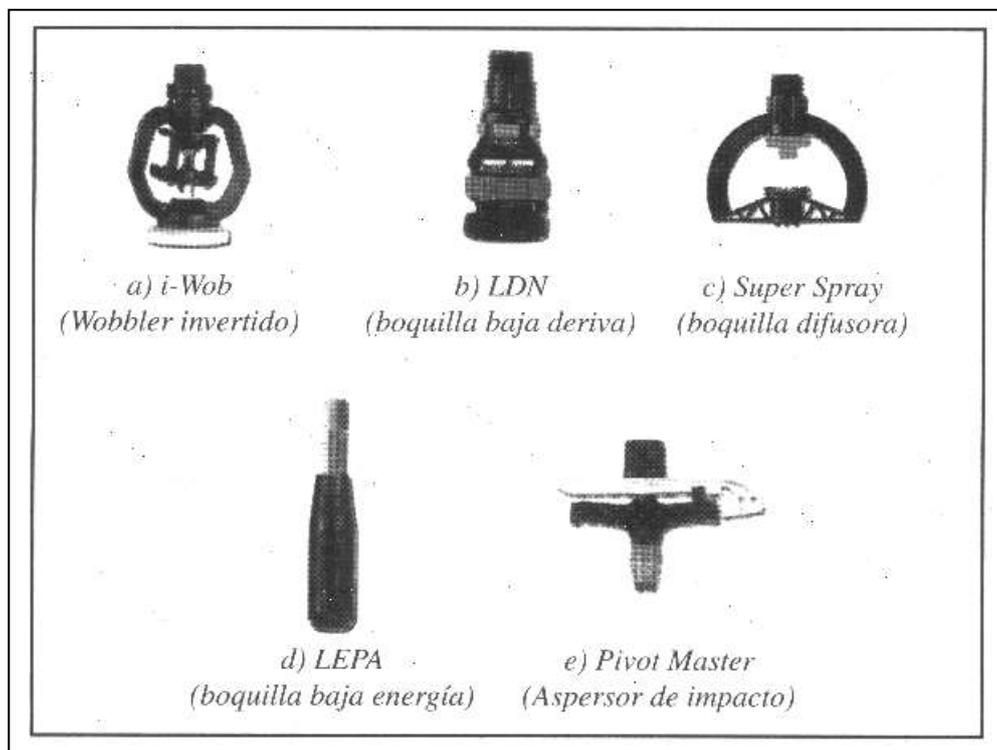


Figura 17 Diferentes tipos de emisores utilizados en pivotes centrales

En el cuadro 21 se presenta algunas características de los diferentes tipos de aspersores

<b>Tipo de aspersores</b>	<b>Presión (m.c.a)</b>	<b>Radio de cobertura (m)</b>	<b>Espaciamiento (m)</b>
Impacto (alta presión)	45-52	20	8-10
Impacto (presión media)	27-35	14	3-6
Impacto (baja presión)	17-24	10	2-4
Rociador	17-24	5	1.5-3

Cuadro 21 Radios de cobertura y espaciamiento generalmente utilizados para diferentes tipos de aspersores

Un caso especial de emisor es el de "Aplicación de Precisión de baja Energía (LEPA)". Los sistemas LEPA tiene tuberías bajantes desde la lateral a cada metro, extendiéndose hasta la superficie del suelo, donde un emisor de baja presión reemplaza al aspersor

(Figura 17). El agua es aplicada directamente al surco y las pérdidas por evaporación se minimizan ya que la canopia no se moja. El cultivo es plantado en círculo para que los bajantes no dañen las plantas. Por otra parte, para evitar el escurrimiento superficial se realizan práctica de manejo en la construcción de los surcos que faciliten el almacenamiento superficial del agua y retarden el escurrimiento superficial

Las áreas regadas por los equipos pueden ser extendidas adicionando un cañón final , de alta caudal, de un costo relativamente bajo. El sistema de cañón es de alta presión, por lo cual se incorpora una bomba al final de la lateral para dar la presión que requiere el cañón, entrando solo en operación cuando se programe el funcionamiento de este. La profundidad de la aplicación de agua que produce el cañón disminuye con la distancia y puede provocar un severo estrés en los bordes del terreno. Existen además "sistemas esquinas", que son estructuras especiales, de alto costo, que permiten regar aquellas áreas a las cuales no alcanza el pivote, de tal forma que la figura del área regada no es circular, sino cuadrada.

## 2.- Forma de funcionamiento del pivote central

Como ya se ha indicado, los pivotes riegan en círculo, lo cual implica que las torres externas deben realizar un mayor recorrido que las torres internas, por lo tanto es imposible que todas las torres avancen con la misma velocidad. De esta forma, frente a tramos de igual longitud, los más externos riegan una mayor superficie que los internos. Cerca del 75% del área regada se encuentra en la mitad externa del radio del pivote (figura 18). Por ello el manejo y la operación del sistema se enfoca a las torres externas.

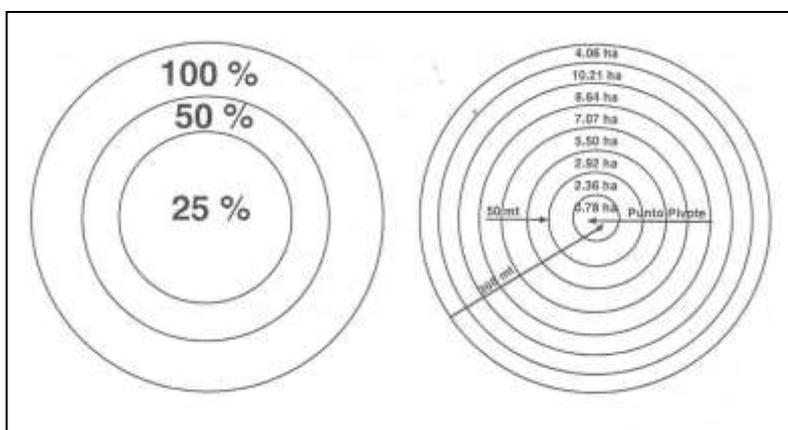


Figura 18 Área mojada a diferentes distancias del centro del pivote

La torre mas alejada del punto de pivote controla el movimiento de la máquina. El tiempo de rotación mínimo del pivote es entre 14 y 20 hrs. (2-3 m/min en la torre final), sin embargo en cada torre se pueden instalar cajas reductoras para aumentar la velocidad y así reducir el tiempo de rotación a menos de 12 hrs (4,3 m/min en torre final). Un panel de control regula la velocidad media de la torre más alejada, que actúa como guía para el sistema completo. Esta torre se hace funcionar un cierto porcentaje de tiempo de cada minuto, un 100% produce que la máquina avance a máxima velocidad (mínimo tiempo de rotación), mientras al 50% de avance, la última torre se mueve a la mitad de su velocidad máxima. La velocidad de la rotación esta

estrechamente asociada a la lámina de riego que se quiere aplicar. A mayor velocidad de avance de la última torre, menor es la magnitud de la lámina de agua aplicada, y viceversa.

Dado que los tramos finales cubren una mayor superficie y avanzan a una mayor velocidad que los tramos interiores, para mantener una lámina de riego pareja a lo largo de la lateral, los aspersores debe ir aumentando su caudal a medida que se alejan del punto pivote (centro de la máquina). Esto implica que la intensidad de precipitación va en aumento llegando a un máximo en la última torre. En algunos casos esta intensidad de precipitación puede sobrepasar la velocidad de infiltración del suelo provocando acumulación de agua en superficie o escurrimiento superficial. En la figura 19 se muestra como varía la intensidad e aplicación a medida que los aspersores se alejan del punto de pivote.

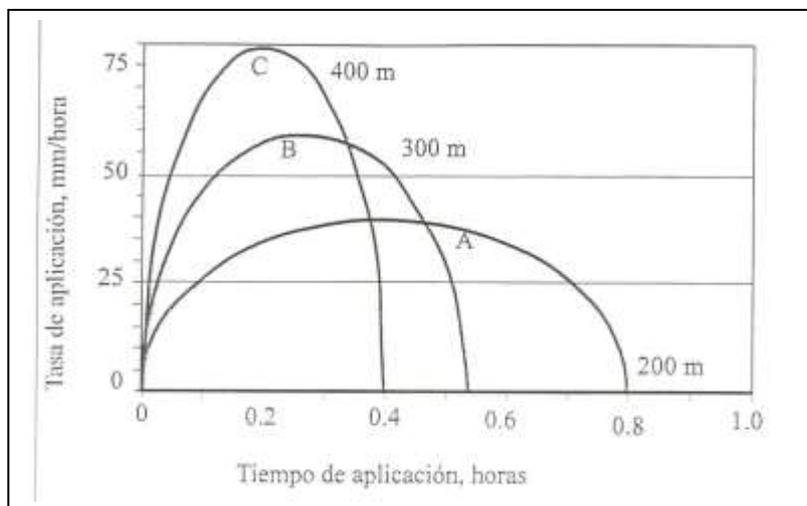


Figura 18 Intensidad de aplicación a distintas distancias del punto pivote

Por la razón antes indicada, entonces mientras mayor sea la longitud del pivote más alta es la intensidad de precipitación de los aspersores de la última torre. Esto puede llegar a ser un problema en suelos de muy baja velocidad de infiltración o en terrenos con pendiente o de lomajes. Una forma de disminuir la intensidad de precipitación es seleccionando para los últimos tramos boquillas o aspersores que mojen un mayor diámetro aumentando el área mojada. Otra forma de evitar este hecho es disminuyendo la longitud del pivote, lo que implica regar una menor superficie o tener más de una máquina para regar la misma superficie. Existe también la posibilidad de realizar prácticas de manejo de suelo que favorezcan la infiltración y eviten o reduzcan el escurrimiento superficial (ej subsolado, presencia de rastros). Incluso en USA se cultiva con surcos en los cuales a los cuales se le construyen tacos cada cierta distancia para aumentar la capacidad de almacenamiento superficial.

También se puede actuar aumentando la velocidad de rotación de la máquina, de tal manera de aplicar láminas pequeñas y aprovechar la parte alta de la curva de velocidad de infiltración ( figura 19)

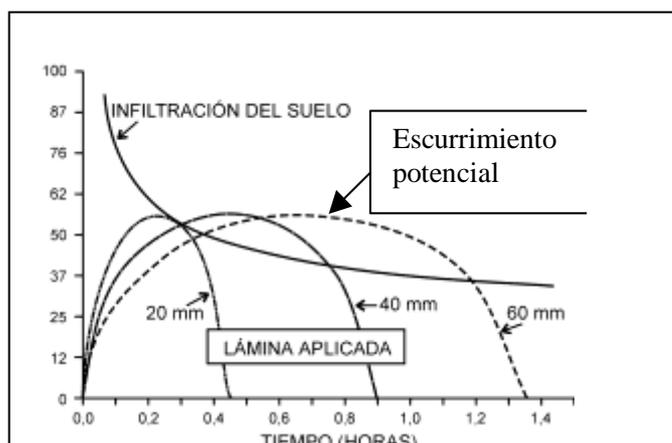


Figura 19 relación entre la magnitud de la lámina de riego y el escurrimiento superficial potencial del agua . La parte de las curvas de mojamiento por sobre la velocidad de infiltración presentan riesgo de escurrimiento superficial

Finalmente es necesario considerar que el suelo tiene una cierta capacidad de almacenamiento superficial, que es función de la pendiente del terreno, por lo cual el escurrimiento se producirá solo si se supera esta capacidad de almacenamiento.

En el cuadro 22 se presenta la capacidad de almacenamiento que presentan los suelos, en función de la pendiente del terreno.

Pendiente (%)	Almacenamiento Superficial Permisible (mm)
0-1	12.7
1-3	7.6
3-5	2.5
>5	0.0

Cuadro22Capacidad de almacenamiento superficial en función de la pendiente del terreno

### 3.-Elementos básicos del diseño

Tal como ya se ha visto, el diseño de un sistema de riego presurizado, cualquiera que sea, requiere de un diseño agronómico y uno hidráulico, y el caso de los pivotes no es la excepción . La demanda de agua en el mes de máxima es el punto más importante a considerar. Las condiciones de suelo también deben ser tomadas en cuenta, en particular las características de infiltración del suelo. Es necesario tener presente que en el caso de los pivotes, por ser una máquina de riego de desplazamiento continuo, no interesa solo la velocidad de infiltración básica del suelo, sino la curva de infiltración en función del tiempo, dado que este tipo de equipos saca partido de las altas velocidades de infiltración que presentan los suelos al inicio del proceso. Esta información no está normalmente disponibles, por lo que los diseñadores trabajan con las denominadas "familias de curvas" de acuerdo a las condiciones texturales del suelo. Estas familias de curvas fueron desarrolladas por el USDA, para diferentes suelos en USA, y pueden ser

consideradas como una referencia. La ecuación que define estas familias de curvas se presenta en anexo

Por otra parte, es necesario disponer de la información topográfica para conocer los desniveles máximos que existen entre los extremos del pivote (plano en curvas de nivel) y la cota de la fuente de agua.

A continuación se presentan algunos elementos básicos a considerar en el diseño de un sistema de pivote central. Es necesario señalar que, en este tipo de máquinas de riego, normalmente se entregan a los antecedentes básicos a las empresas fabricantes, quienes envían la máquina adecuada a los requerimientos solicitados.

### Diseño agronómico

- Área de riego y radio del brazo del pivote

De acuerdo a las características de tamaño y forma del predio se define la ubicación del punto pivote y longitud total del brazo de la máquina, R (R incluye la longitud del pivote hasta la última torre más el voladizo. En el caso de este ejemplo no se incluirá el cañón final ni uso de sistema esquina

A partir de este valor se define el área que será regada por la máquina.

$$A = \frac{\pi * R^2}{10.000} \quad (54)$$

A = área regada en há

R = radio total del brazo del pivote

Ejemplo, Se coloca un pivote en el punto central de un potrero, con una longitud de brazo de la máquina de 325 m. (300 m a la última torre más 25 m de voladizo. El área regada por el pivote será de 33,2 há.

- Capacidad máxima del equipo

La capacidad máxima del equipo corresponde al caudal necesario para satisfacer los requerimientos diarios del cultivo en el mes de máxima demanda. Por lo tanto la capacidad del equipo depende de la Etm máxima del cultivo, de la eficiencia del sistema de riego, de la superficie a regar y del tiempo diario de operación del equipo ( $T_0$ ).

Valores de eficiencia potencial que se consideran en pivotes, de acuerdo a condiciones de clima imperantes son las siguientes

Clima	Eficiencia (%)
Fresco	80
Moderado	75
Caliente	70
Desértico	65

En relación al  $T_o$ , es recomendable que sea menor de 24 hr, para tener un tiempo que permita solucionar posibles problemas de reparación o mantenimiento del equipo, normalmente se considera un tiempo de operación diaria de 22 horas. Por otra parte dado el gran grado de automatización que presentan los pivotes se operan los 7 días de la semana

La capacidad del equipo depende de la evapotranspiración máxima del cultivo, de la eficiencia de aplicación, de la superficie de riego y de las horas de operación al día:

$$Q_t = \frac{E_{tm} * A * 10}{E_{fa} * T_o} \quad (55)$$

$Q_t$  = Caudal total del sistema (  $m^3/hr$  )

$A$  = superficie a regar en há

$E_{fa}$  = eficiencia de riego

$T_o$  = horas de operación al día

Ejemplo, si la demanda es de 5,5 mm/día, la eficiencia de 80% y las horas de operación al día son 22 horas, la capacidad del equipo para regar 33,2 há debe ser

$$Q_t (m^3/h) = (5,5 * 33,2 * 10) / (0,8 * 22) = 103,8 m^3/h$$

Lo que equivale a 28,8 l/s

Es necesario tener presente que la disponibilidad de agua de los predios debe ser suficiente para cubrir la demanda requerida, de lo contrario hay que disminuir el área regada.

- Tiempo mínimo de rotación y número de rotaciones por día

La velocidad de avance del equipo está controlada por la última torre. Todas las torres interiores se van ajustando a la posición que adquiere esta torre para quedar alineadas.

Los motoredutores que comandan las ruedas pueden llegar a desarrollar velocidades de entre 3 a 4 m/m. Como máximo, dependiendo de las características del motoreductor. La información sobre la velocidad máxima de avance se puede obtener de los catálogos de los proveedores

La velocidad de avance del equipo define el tiempo de rotación, a mayor velocidad menor es el tiempo de rotación. Hay que tener presente también que a menor tiempo de rotación, menor es la magnitud de la lámina aplicada

El tiempo de rotación se calcula como sigue

$$Tr = \frac{2 * \pi R_L}{V_{ut} * 60} \quad (56)$$

Tr tiempo de rotación en horas

$V_{ut}$ , velocidad máxima de avance de la última torre (m/min)

$R_L$  es el radio del brazo del pivote, desde el centro hasta la última torre (distancia de la última torre al centro pivote, no se considera el voladizo)

Ejemplo, Los motoredutores del pivote desarrollan una velocidad de 3 m/min. Por lo tanto el tiempo de rotación del pivote (hasta la última torre, 300 m, es):

$$Tr = 2 * 3,14 * 300 \text{ (m)} / (3 \text{ m/(min)} * 60) = 10,47 \text{ horas.}$$

Dado que el equipo debe satisfacer la Etm máxima, es necesario determinar el número de rotaciones que la máquina debe realizar cada día para satisfacer la demanda a la velocidad de avance definida

$$Nr = \frac{T_0}{Tr} \quad (57)$$

Nr = número de rotaciones por día

$T_0$  es el tiempo diario de operación

En el ejemplo que se viene desarrollando, el tiempo máximo de operación es de 22 horas, por lo tanto considerando un tiempo de rotación (Tr) de 10,47, el equipo debe rotar 2,1 veces.

De esta forma se aplica se satisfacen los 5,5 mm/día de Etm, como se demuestra a continuación:

Caudal del equipo 103,8 m<sup>3</sup>/hr

Tiempo de rotación 10,47

Caudal aplicado en una rotación (103,8 m<sup>3</sup>/hr \* 10,47 hr) = 1086,8 m<sup>3</sup>

Altura de agua aplicada (mm/rotación) = (1086,8 m<sup>3</sup> / (33,2 há 10.000 m<sup>2</sup>) \* 1000) = 3,27 mm rotación

Altura de agua aplicada en 2,1 rotación al día = (3,27 \* 2,1) = 6,87

Lámina neta, considerando eficiencia de 80% = (6,87 \* 0,8) = 5,5 mm/día

- Tiempo máximo de rotación

El tiempo de rotación de la máquina se puede aumentar disminuyendo la velocidad de avance de la última torre. Mientras más lento es el avance de la máquina, mayor es la lámina de riego que se aplica en cada vuelta. Sin embargo la velocidad mínima de avance de la máquina se debe ajustar a las características de infiltración del suelo, de tal

manera que no se produzca o se minimice el escurrimiento superficial. La intensidad de precipitación del último aspersor debe ser igual o menor a la velocidad de infiltración del suelo. Además es necesario considerar la capacidad de almacenamiento superficial del suelo.

a) Intensidad de precipitación en la última torre

Una aproximación a la intensidad de precipitación del aspersor ubicado en la última torre se puede calcular de acuerdo a la siguiente expresión, considerando que el aspersor tiene un patrón de mojamiento elíptico

$$I_{pp} = \frac{E_{tm}}{T_o \times E_{fa}} \times (8 \times R_L / W) \quad (58)$$

$I_{pp}$ , intensidad de lluvia del último aspersor (mm/hr)

$E_{tm}$ , en mm/día

$T_o$  en horas

$W$  ancho del patrón de mojamiento del aspersor (m)

En el caso del ejemplo,  $E_{tm}$  es de 5,5 mm,  $E_{fa}$  80% (0,8),  $R_L$  es de 300 m. Se considera el uso de un aspersor de baja presión con un ancho de mojamiento ( diámetro) de 14 m ( cuadro 21) . En estas condiciones, con  $T_o$  de 22 horas, la intensidad de precipitación es

$$I_{pp} = ( 5,5 / (22 * 0,8) ) * (8 * 300 / 14) = 53,57 \text{ mm/hora}$$

b) Determinación de la velocidad de infiltración

Dado que el pivote está avanzando constantemente, la infiltración se realiza en la parte alta de la curva de velocidad de infiltración, por lo cual se requiere conocer las características de infiltración del suelo en este momento, que es muy superior a la .velocidad de infiltración básica ( ver capítulo de física de suelos). Es necesario por lo tanto contar con información respecto a este parámetro, para determinar a los cuantos minutos de iniciado el riego de un punto, la intensidad de precipitación del último aspersor iguala a la velocidad de infiltración del suelo. Generalmente no se dispone de esta información, por lo cual se puede considerar como referencial la " familia de curvas de infiltración" desarrollada por el USDA ( ver anexo). En la figura 20 , se presenta una curva de velocidad de infiltración, que será utilizada para este ejemplo.

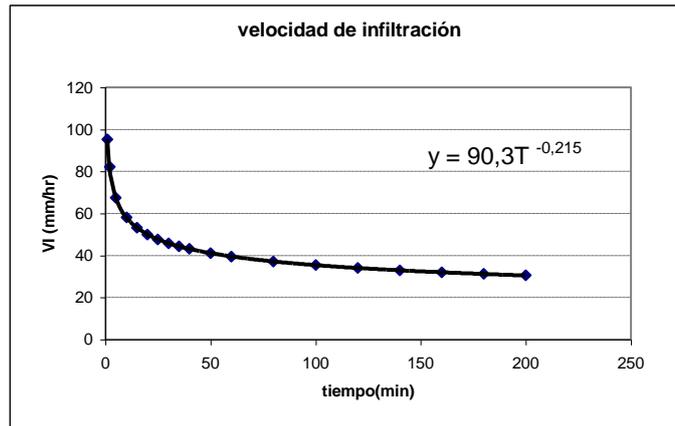


Figura 20 curva de velocidad de infiltración del suelo

La velocidad de infiltración está definida por la ecuación (ecuación de Kostiakov)

$$VI = D \times T^{-m} \quad (59)$$

Donde VI, es la velocidad de infiltración en mm/hr

D es una constante y representa la velocidad de infiltración en el primer minuto del proceso

T es el tiempo en minutos, y -m la pendiente de la curva

De acuerdo a esta ecuación, el tiempo al cual se produce una VI determinada se puede calcular como sigue :

$$T = (VI/D)^{-1/m} \quad (60)$$

En el caso del ejemplo, la velocidad de infiltración está definida como  $VI = 90,3 T^{-0,215}$ , por lo tanto, si la intensidad de precipitación del ultimo aspersor es de 53,6 mm/hr, el tiempo al cual comenzaría a producirse escurrimiento superficial (Tes) es de

$$T_{es} = (53,6/90,3)^{-1/0,215} = 11,3 \text{ minutos}$$

c) Velocidad mínima de avance de la máquina y tiempo máximo de rotación

La velocidad mínima de avance de la maquina será aquella que no produzca escurrimiento superficial , la cual se obtiene de la siguiente relación :

$$V_{min} = W/T_{es} \quad (61)$$

W = es el ancho de mojado del aspersor (m)

Tes = tiempo al cual comienza a producirse el escurrimiento superficial (min)

De acuerdo al ejemplo, la velocidad mínima de avance de la máquina es 1,13 m/min (W = 14 y Tes 11,3 min).

El tiempo máximo de rotación es

$$T_{\max} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_L}{V_{\min} \cdot 60} \quad (62)$$

De acuerdo a los antecedentes de del ejemplo, el tiempo máximo de rotación es de 25,5 horas

- Caudal de los aspersores

A objeto de mantener una uniformidad en la aplicación del agua a lo largo del brazo del pivote el caudal de cada aspersor va aumentando a medida que se aleja del centro del pivote. A mayor distancia del centro del pivote cada aspersor debe cubrir un área mayor y la maquina se mueve más rápido por lo cual requiere más caudal.

El caudal de los aspersores, cuando estos están separados a una distancia constante a lo largo del brazo del pivote, se puede calcular como:

$$q_{an} = (2 \cdot Q_t \cdot R_n \cdot DEA) / (R_L)^2 \quad (63)$$

Donde,  $q_{an}$  es el caudal del aspersor individual ubicado a n metros del centro del pivote (l/s)

$R_n$ , es la distancia a la cual se ubica el aspersor desde el centro del pivote, en m

DEA, distancia entre aspersores, en m

$R_L$ , longitud máxima del brazo del pivote (m).

En el ejemplo que se viene realizando, el caudal del aspersor más lejano, suponiendo que los aspersores están a una distancia constante de 3 m uno de otro, es de 0,58 l/s ( $2 \cdot 28,8 \cdot 300 \cdot 3 / (300 \cdot 300)$ )

Será necesario seleccionar el aspersor que cumple con las condiciones de caudal y ancho de mojado de los catálogos de los fabricantes

Nota : en el caso de pivotes muy largos, es posible disminuir la intensidad de precipitación en las torres finales colocando dos aspersores de la mitad del caudal que le corresponde a cada uno, separándolo de la lateral mediante tubería de alargamiento de tal manera de incrementar el ancho de mojamiento.

Por otra parte, en las máquinas modernas la tendencia es hacia emisores de baja presión y bajo diámetro de mojamiento, con el emisor transitando entre la hilera de cultivos (por ejemplo es el caso del LEPA), por lo cual se siembra con surcos y se construyen tacos que permitan aumentar el almacenamiento superficial de agua en el suelo

### Diseño hidráulico

El diseño hidráulico consiste en determinar el diámetro de la tubería que forma el brazo del pivote, y la presión a la entrada de la máquina. El otro aspecto a considerar es la tubería de aducción que llega el agua desde la fuente hasta el centro del pivote

La velocidad del agua al interior de las tuberías de acero del lateral debe ser del orden de 1,5 m/s y la variación de presiones no debe ser superior a 20% de la presión de operación de los aspersores, aún cuando en la actualidad se ocupan aspersores de baja presión ( 7 a 10 m.c.a) con reguladores de presión en cada uno, lo que elimina los efectos de la variación de presión a lo largo de la tubería.

La mayoría de las máquinas utilizan diámetros de entre 135 a 250 m, dependiendo del caudal a movilizar. Las perdidas por fricción se calculan por tramos , partiendo desde el último, y para el cálculo de las pérdidas de carga se utiliza la ecuación de Hazzen - Willians, con un valor C de 120

$$P_f = 1,213 \cdot 10^{10} \cdot Q^{1.851} \cdot C^{-1.851} \cdot D_i^{4.869} \cdot L \quad (64)$$

- Pf pérdida de fricción en el tramo
- Q, caudal del tramo, en l/s
- Di, diámetro interno de l tubería en mm
- L, longitud del tramo, m

El primer tanteo para determinar el diámetro se puede realizar utilizando la relación derivada de Bresse ( relación 32), que entrega diámetros internos de tuberías para velocidades cercanas a 1,5 m/s.

La presión a la entrada de la máquina se calcula como,

$$PEM = P_o + Prp + P_e + \Sigma P_f + (H_m - H_e) + P_s + Z$$

PEM presión a la entrada de la máquina (m.c.a)

Po = Presión de operación del aspersor (m.c.a)

Prp = pérdida en el regulador de presión del aspersor (m.c.a)

Pel, es la pérdida en la tubería colgante del aspersor (m.c.a)

$\Sigma Pf$  = sumatoria de las pérdidas por fricción de cada tramo (m.c.a)

(Hm-He) diferencia entre la altura del pivote y la longitud de la tubería colgante del aspersor (m.c.a)

Ps = pérdidas singulares

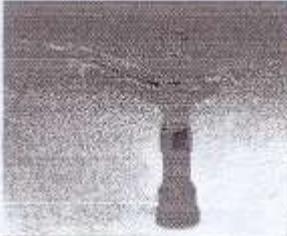
Z = desnivel entre el centro del pivote y el extremo del brazo para la condición más extrema

Una vez conocido los requerimientos de presión a la entrada del pivote, es necesario determinar el diámetro y las pérdidas de carga que se producen en la tubería de aducción entre la fuente de agua y el centro del pivote

La carga dinámica total se calcula de la misma forma que se ha visto en capítulos anteriores.

Es necesario tener presente, sin embargo que dependiendo de la calidad de l agua se requerirá contar con decantadores de partículas gruesas ( desarenador) y en algunos casos con filtros de malla que limiten el paso de material más fino hacia las boquillas. Los filtros se deben seleccionar de acuerdo al caudal y las pérdidas de carga que se produzcan en ellos adicionarlos a la carga dinámica total, para determinar los requerimientos de bombeo

## **ANEXOS**



# RAIN BIRD

## PERFORMANCE DATA

70H

### 70H

#### 1" (25 mm) Full Circle, Brass Impact Sprinkler

Bearing: 1" Female NPT or BSP, Brass  
 Trajectory Angle: 21°  
 Operating Range: 2.8-5.5 bars  
 Flow Rate: 2.00-10.40 m<sup>3</sup>/h  
 Radius: 17.39-25.01 meters

#### FEATURES

- Heavy duty brass construction
- 1" Female NPT Bearing
- Integral Straightening Vanes
- Stainless steel springs and fulcrum pin
- Chemically resistant washers
- Dual nozzle ports
- Two year warranty

#### BENEFITS

- Integral straightening vanes increase distance of throw
- Wide range of flow rates
- Corrosion and grit resistant
- Built to last

#### Straight Bore Nozzle (SBN-4) with Plug (Stream Height: 2.4m)

GPM @ Nozzle	NOZZLE SIZE						
	5.56 mm (0.22")	6.35 mm (0.25")	7.14 mm (0.28")	7.94 mm (0.31")	8.73 mm (0.34")	9.53 mm (0.37")	10.32 mm (0.41")
2.8	17.4 0.66 2.00	18.3 0.73 2.41	19.1 0.92 3.32	19.8 1.12 4.02	20.3 1.33 4.79	20.7 1.54 5.54	21.3 1.80 6.47
3.0	17.7 0.68 2.09	18.5 0.76 2.72	19.4 0.96 3.46	20.1 1.17 4.21	20.6 1.39 5.01	21.2 1.61 5.79	21.8 1.88 6.77
3.5	18.2 0.67 2.26	18.9 0.82 2.95	20.0 1.04 3.73	20.8 1.27 4.56	21.4 1.51 5.45	21.9 1.75 6.30	22.6 2.05 7.30
4.0	18.6 0.67 2.43	19.6 0.88 3.17	20.5 1.12 4.01	21.6 1.38 4.90	22.1 1.62 5.84	22.5 1.89 6.81	23.3 2.21 7.95
4.5	19.1 0.72 2.59	19.8 0.94 3.37	21.0 1.19 4.28	22.1 1.45 5.21	22.7 1.73 6.23	23.2 2.02 7.28	23.9 2.35 8.47
5.0	19.5 0.78 2.72	20.3 0.99 3.56	21.5 1.26 4.62	22.6 1.54 5.53	23.3 1.83 6.60	23.8 2.14 7.69	24.3 2.45 8.92
5.5	19.8 0.79 2.86	20.7 1.04 3.75	21.8 1.32 4.75	23.0 1.62 5.64	23.8 1.93 6.85	24.5 2.25 8.11	25.0 2.61 9.49

#### Straight Bore Nozzle (SBN-4) with Spreader (LAN-1-20) (Stream Height: 2.4m)

GPM @ Nozzle	NOZZLE SIZE						
	5.56 mm x 3.18 mm (0.22" x 1.25") 20°	6.35 mm x 3.18 mm (0.25" x 1.25") 20°	7.14 mm x 3.18 mm (0.28" x 1.25") 20°	7.94 mm x 3.18 mm (0.31" x 1.25") 20°	8.73 mm x 3.18 mm (0.34" x 1.25") 20°	9.53 mm x 3.18 mm (0.37" x 1.25") 20°	10.32 mm x 3.18 mm (0.41" x 1.25") 20°
2.8	17.4 0.73 2.93	18.3 0.90 3.25	19.1 1.10 3.95	19.8 1.29 4.68	20.3 1.51 5.43	20.7 1.72 6.18	21.3 1.98 7.13
3.0	17.7 0.77 2.76	18.5 0.94 3.39	19.4 1.15 4.13	20.1 1.35 4.88	20.6 1.58 5.68	21.2 1.80 6.46	21.8 2.07 7.45
3.5	18.2 0.83 2.98	18.9 1.02 3.66	20.0 1.23 4.44	20.8 1.47 5.29	21.4 1.71 6.16	21.9 1.95 7.01	22.6 2.26 8.13
4.0	18.6 0.89 3.19	19.4 1.09 3.93	20.5 1.32 4.73	21.6 1.57 5.67	22.1 1.83 6.60	22.5 2.10 7.53	23.3 2.43 8.74
4.5	19.1 0.95 3.41	19.8 1.16 4.19	21.0 1.42 5.10	22.1 1.66 6.05	22.7 1.96 7.06	23.2 2.28 8.10	23.9 2.59 9.29
5.0	19.5 0.99 3.53	20.3 1.23 4.42	21.5 1.49 5.37	22.6 1.77 6.38	23.3 2.07 7.46	23.8 2.37 8.34	24.3 2.68 9.67
5.5	19.8 1.04 3.75	20.7 1.29 4.62	21.8 1.56 5.63	23.0 1.87 6.72	23.8 2.18 7.84	24.5 2.50 8.99	25.0 2.89 10.40

## PART NUMBERS AND ORDERING INFORMATION

Ordering Example	MAKE YOUR SPRINKLER CHOICE FROM CHART 1	CHOOSE NOZZLE SIZE (S) FROM CHART 2	ADD THEM TOGETHER TO CREATE THE PART NUMBER
To order a 70H sprinkler with a 5.56 mm Brass Straight Bore Nozzle, a Brass Spreader Bushing, and a 3.18 mm Brass 20° Low Angle Spreader Nozzle the part number would be:	<b>A20038-</b>	<b>14-08</b>	<b>= A20038-14-08</b>

Chart 1	PART NUMBER: FIRST HALF
<b>SPRINKLER ONLY / PLUG</b>	
Sprinkler without Nozzle (NPT)	<b>A20000</b>
Sprinkler without Nozzle plus Brass Plug (NPT)	<b>A20001</b>
<b>SPRINKLER WITH SINGLE NOZZLE INSTALLED</b>	
Sprinkler with SBN-4 and Plug (NPT)	<b>A20002-</b>
<b>SPRINKLER WITH COMBINATION NOZZLES INSTALLED</b>	
Sprinkler with SBN-4, SPB-1 and LAN-1-20 (NPT)	<b>A20038-</b>
<b>SPRINKLER ONLY / PLUG</b>	
Sprinkler without Nozzle (BSP)	<b>A20080</b>
Sprinkler without Nozzle plus Brass Plug (BSP)	<b>A20075</b>
<b>SPRINKLER WITH SINGLE NOZZLE INSTALLED</b>	
Sprinkler with SBN-4 and Plug (BSP)	<b>A20077-</b>
<b>SPRINKLER WITH COMBINATION NOZZLES INSTALLED</b>	
Sprinkler with SBN-4, SPB-1 and LAN-1-20 (BSP)	<b>A20085-</b>

Chart 2	PART NUMBER: SECOND HALF								
NOZZLE	3.18 mm	5.18 mm	6.35 mm	7.14 mm	7.94 mm	8.73 mm	9.53 mm	10.32 mm	
Brass Straight Bore Nozzle (100382-)	SBN-4	-	14	16	18	20	22	24	26
Brass Spreader Bushing (100418-)	SPB-1	(Needed for use with LAN-1-20)							
Brass 20° Low Angle Spreader Nozzle (100226-)	LAN-1-20	08	-	-	-	-	-	-	
Brass Plug (100417)									

### Aspersor 501-U

Tamaño de la boquilla mm	F atm	Q l/h	D m	Precipitación en mm/h (espaciamiento en m)										
				6x6	6x7	7x7	7x8	8x8	8x9	9x9				
1,6 Rojo	1,5	100	11,5	2,7	2,4	2,0	1,8	1,6	1,4	-	-	-	-	-
	2,0	117	13,0	3,2	2,8	2,4	2,1	1,8	1,6	-	-	-	-	-
	2,5	131	13,5	3,6	3,1	2,7	2,3	2,0	1,8	-	-	-	-	-
	3,0	144	13,5	4,0	3,4	2,9	2,6	2,2	2,0	1,8	-	-	-	-
	3,5	155	14,0	4,3	3,7	3,1	2,8	2,4	2,1	1,9	-	-	-	-
1,8* Verde	1,5	138	12,0	3,8	3,3	2,8	2,5	2,2	1,9	1,7	-	-	-	-
	2,0	160	13,0	4,4	3,8	3,3	2,9	2,5	2,2	2,0	-	-	-	-
	2,5	178	13,5	4,9	4,2	3,6	3,2	2,8	2,5	2,2	-	-	-	-
	3,0	196	14,0	5,4	4,7	4,0	3,5	3,1	2,7	2,4	-	-	-	-
	3,5	212	14,0	5,9	5,0	4,3	3,8	3,3	2,9	2,6	-	-	-	-
2,0 Azul	1,5	170	13,5	4,7	4,0	3,5	3,0	2,7	2,4	2,1	-	-	-	-
	2,0	195	14,0	5,4	4,6	4,0	3,5	3,0	2,7	2,4	-	-	-	-
	2,5	217	15,0	6,0	5,2	4,4	3,9	3,4	3,0	2,7	-	-	-	-
	3,0	236	15,5	6,5	5,6	4,8	4,2	3,7	3,3	2,9	-	-	-	-
	3,5	253	15,5	7,0	6,0	5,2	4,5	3,9	3,5	3,1	-	-	-	-
2,2 Amarillo	1,5	187	13,5	5,2	4,4	3,8	3,3	2,9	2,6	2,3	-	-	-	-
	2,0	219	14,0	6,0	5,2	4,4	3,9	3,4	3,0	2,7	-	-	-	-
	2,5	244	15,5	6,7	5,8	4,9	4,3	3,8	3,4	3,0	-	-	-	-
	3,0	267	16,0	7,4	6,3	5,4	4,7	4,2	3,7	3,3	-	-	-	-
	3,5	288	16,0	8,0	6,9	5,9	5,1	4,5	4,0	3,6	-	-	-	-

Las zonas sombreadas no son recomendadas para el riego ideal.

\* Boquilla estándar

### Aspersor 502-H

Tamaño de la boquilla mm	P atm	Q l/h	D m	Precipitación en mm/h (espaciamiento en m)					
				8x8	8x9	9x9	9x10	10x10	
2,5 Rojo	1,5	226	13,0	3,5	3,1	2,8	2,5	2,3	-
	2,0	263	15,0	4,1	3,6	3,2	2,9	2,6	-
	2,5	292	15,5	4,6	4,0	3,6	3,2	2,9	-
	3,0	318	16,5	5,0	4,4	3,9	3,5	3,2	-
	3,5	345	17,0	5,4	4,8	4,2	3,8	3,4	-

Las zonas sombreadas no son recomendadas para el riego ideal.

### Aspersor 5022-U

Tamaño de la boquilla mm	P atm	Q l/h	D m	Precipitación en mm/h (espaciamiento en m)											
				9x9	9x10	10x10	10x11	10x12	11x11	11x12	12x12				
2,4 Amarillo	2,0	320	19,0	4,0	3,6	3,2	2,9	2,7	2,6	2,4	2,2	-	-	-	-
	3,0	390	19,0	4,8	4,3	3,9	3,5	3,3	3,2	3,0	2,7	-	-	-	-
	4,0	460	19,0	5,7	5,1	4,6	4,2	3,8	3,8	3,5	3,2	-	-	-	-
	2,0	460	19,0	5,7	5,1	4,6	4,2	3,8	3,8	3,5	3,2	-	-	-	-
2,4 x 1,8* Amarillo	3,0	560	19,0	6,9	6,2	5,6	5,1	4,7	4,6	4,2	3,9	-	-	-	-
	4,0	650	19,0	8,0	7,2	6,5	5,9	5,4	5,4	4,9	4,5	-	-	-	-
	2,0	350	20,5	4,3	3,9	3,5	3,2	2,9	2,9	2,7	2,4	-	-	-	-
2,5 Púrpura	3,0	430	21,5	5,3	4,8	4,3	3,9	3,6	3,6	3,3	3,0	-	-	-	-
	4,0	490	22,0	6,0	5,4	4,9	4,5	4,1	4,0	3,7	3,4	-	-	-	-
2,8 Naranja	2,0	450	21,0	5,6	5,0	4,5	4,1	3,8	3,7	3,4	3,1	-	-	-	-
	3,0	550	22,5	6,8	6,1	5,5	5,0	4,6	4,5	4,2	3,8	-	-	-	-
2,8 x 2,5 Naranja	4,0	630	23,0	7,8	7,0	6,3	5,7	5,3	5,2	4,8	4,4	-	-	-	-
	2,0	730	21,0	9,0	8,1	7,3	6,6	6,1	6,0	5,5	5,1	-	-	-	-
3,0 Rojo	3,0	900	22,5	11,1	10,0	9,0	8,2	7,5	7,4	6,8	6,3	-	-	-	-
	4,0	1030	23,0	12,7	11,4	10,3	9,4	8,6	8,5	7,8	7,2	-	-	-	-
3,0 Rojo	2,0	510	22,5	6,3	5,7	5,1	4,6	4,3	4,2	3,9	3,5	-	-	-	-
	3,0	630	23,0	7,8	7,0	6,3	5,7	5,3	5,2	4,8	4,4	-	-	-	-
	4,0	720	24,0	8,9	8,0	7,2	6,5	6,0	6,0	5,5	5,0	-	-	-	-

Las zonas sombreadas no son recomendadas para el riego ideal.

\* Boquilla estándar

501-U Completo sobre soporte 50



502-H Completo sobre soporte 52



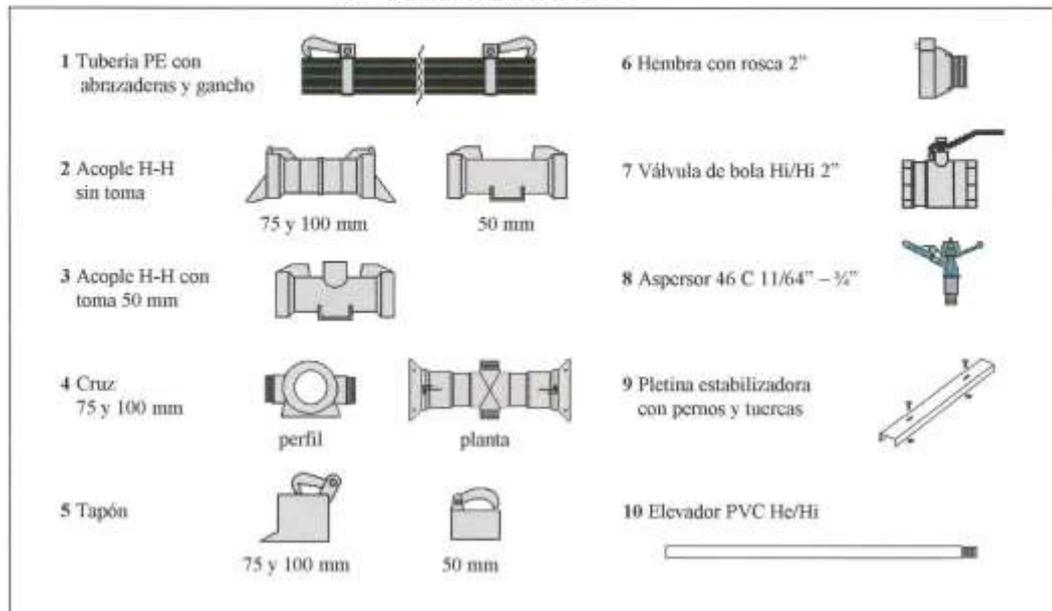
5022-U Completo sobre soporte 52



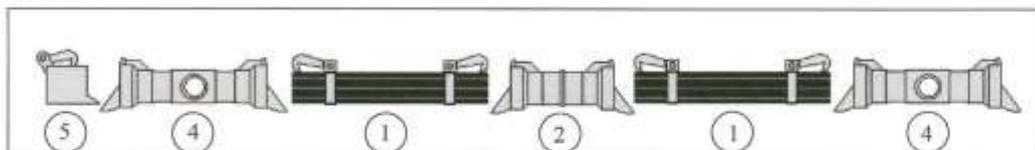
## Anexo 2.- Aspersores de bajo caudal ( mini aspersores)

## Componentes del equipo

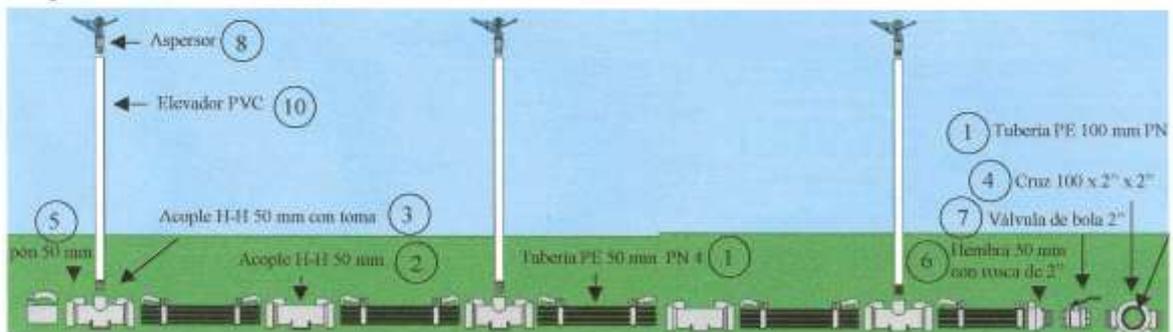
Ver esquema de línea lateral



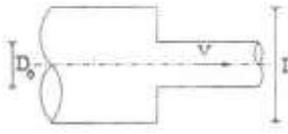
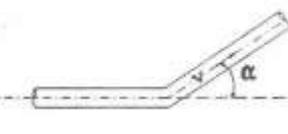
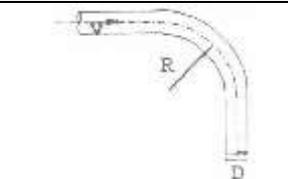
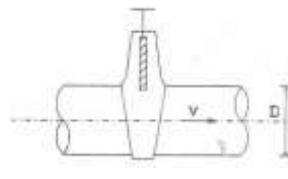
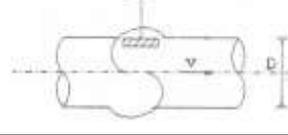
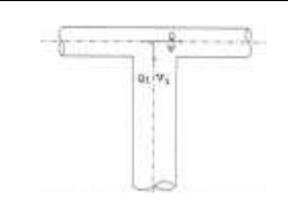
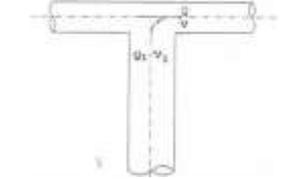
### Matriz



### Esquema de línea lateral



Anexo 3.-Piezas y partes de un sistema de riego estacionario de cobertura total

DESCRIPCIÓN DE LA SINGULARIDAD	ESQUEMA	PARÁMETRO	K	
Ensanche Brusco			$\left( \frac{D_1^2}{D_0^2} - 1 \right)$ (Fórmula de borda)	
Contracción Brusca		D1/D0 0.2 0.4 0.6 0.8	0.44 0.38 0.28 0.14	
Codo		∞ 90° 60° 45° 30°	1.30 – 1.00 0.45 0.25 0.07	
Curva Circular		R/D 0.5 1.0 2.5 5.0 0.0	1.0 0.5 0.3 0.2 0.2	
Compuerta (Abierta)		D(pulg) 1/2 1 2 6 12	1.00 0.23 0.16 0.12 0.02	
Globo (Abierta)			10.0	
Mariposa (Abierta)			0.15 – 0.50	
Bifurcación de corrientes		Q1/Q	<u>K</u>	<u>K</u>
		0	0.00	0.95
		1	0.00	0.92
		2	0.12	0.99
		4	0.21	1.10
		8	0.27	1.17
∞	0.35	1.29		
Confluencia de corrientes		Q1/Q	<u>K</u>	<u>K</u>
		0	0.0	0.00
		0.4	0.014	0.09
		0.6	0.17	0.47
		0.8	0.46	0.72
		2.0	0.91	0.91

NOTA: K1 se refiere al coeficiente de pérdida de carga de la rama secundaria, es decir, el correspondiente a la altura de velocidad

$$\frac{V_1^2}{2g}$$

Anexo 4. Valores de K para el cálculo de pérdidas singulares de diferentes accesorios

TUBO Tuyau Pipe	Pressione Pression Pressure		Boccaglio Buse Nozzle	Portata Débit Rate of flow		Gittata max. Portée max Max. rate of flow	Larghezza irrigata Largeur surface Stripe's width		Velocità di avanzamento m/h Vitesse d'avancement m/h Feed speed m/h					
	Macchina Machine Machine	Irrigatore Arroseur Sprinkler		In aria calma En air calme In still air	Max. consigli. Max. Max. suggested 85%		Altezza di pioggia in mm. Hauteur de pluie en mm. Rain quantity in mm.							
							10	20	30	40	50	60		
m/m	Atm.	Atm.	mm.	lt/sec.	m <sup>3</sup> /h.	m.	m.	m.						
63/270	5.0	2.5	14	3.2	11.5	25	50	42	27	13	9	-	-	-
	5.6	3		3.5	12.6	27	54	45	28	14	9.5	-	-	-
	6.4	3.5		3.8	13.7	29	58	48	29	14	9.5	-	-	-
	5.8	2.5	16	4.2	15.1	26	52	44	34	17	11.5	8.5	-	-
	6.3	3		4.6	16.6	29	58	49	34	17	11.5	8.5	-	-
	7.1	3.5		5	18	31	62	53	34	17	11.5	8.5	-	-
75/250	4.5	2.5	14	3.2	11.5	25	50	42	27	13	9	-	-	-
	5.2	3		3.5	12.6	27	54	45	28	14	9.5	-	-	-
	5.9	3.5		3.8	13.7	29	58	48	29	14	9.5	-	-	-
	6.2	2.5	16	4.2	15.1	26	52	44	34	17	11.5	8.5	-	-
	5.8	3		4.6	16.6	29	58	49	34	17	11.5	8.5	-	-
	6.4	3.5		5	18	31	62	53	34	17	11.5	8.5	-	-
75/270	6.1	4	16	5.3	19.1	31.5	63	54	35	18	12	9	7	6
	6.7	4.5		5.6	20.2	33	66	56	36	18	12	9	7	6
	7.3	5		5.9	21.4	34.5	69	59	36	18	12	9	7	6
	6.3	4	18	7.1	25.6	34.5	69	59	43	21	14	10	8	7
	6.9	4.5		7.5	27.1	36	72	61	44	22	15	11	9	7
	7.7	5		7.9	28.3	37.5	75	64	44	22	15	11	9	7
82/250	5.9	4	18	7.1	25.6	34.5	69	59	43	21	14	10	8	7
	6.5	4.5		7.5	27.1	36	72	61	44	22	15	11	9	7
	7.1	5		7.9	28.3	37.5	75	64	44	22	15	11	9	7
	6.5	4	20	8.8	31.3	36.5	73	62	51	26	17	13	10	8
	7.1	4.5		9.3	33.5	39	78	66	51	26	18	13	10	9
	7.7	5		9.5	35	40	80	68	52	26	18	13	11	9
90/340	6.9	4	22	10.6	38.3	39	78	66	58	29	20	15	12	10
	7.7	4.5		11.3	40.6	40.5	81	69	59	30	20	15	12	10
	8.5	5		11.8	42.4	42	84	72	60	30	20	15	12	10
	7.9	4	24	12.7	45.7	43	86	73	63	32	21	16	13	11
	8.7	4.5		13.3	48.3	43.5	87	74	65	33	22	17	13	11
	9.5	5		13.9	50.4	45	90	77	66	33	22	17	13	11
100/330	8.4	5	26	16.4	59.1	50	100	85	70	35	23	18	14	12
	9.1	5.5		17.2	62.1	51	102	87	71	35	24	18	15	12
	9.8	6		18	64.8	52	104	88	74	37	25	19	15	12
	9.1	5	28	19	68.6	53	106	90	76	38	25	19	15	13
	9.8	5.5		20.2	72.8	55	110	94	78	39	26	20	16	13
	10.5	6		20.9	75.2	56	112	95	79	40	27	20	16	13
110/300	8.5	5	30	22.1	79.5	55	110	94	86	43	28	21	17	14
	9.2	5.5		23.1	83.3	57	114	97	86	43	29	22	17	14
	9.9	6		24	86.4	59	118	100	87	44	29	22	18	14
	8.7	4.5	32	23.8	85.8	54	108	92	93	46	31	23	19	15
	9.4	5		24.9	89.6	57	114	97	93	46	31	23	19	15
	10.2	5.5		26.6	94.8	59	118	100	95	48	32	24	19	16

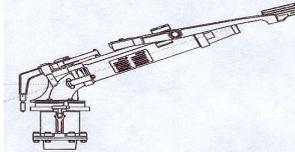
Anexo 5.- Catalogo típico de un carro auto propulsado



# 100 SERIES BIG GUN® PERFORMANCE — METRIC

## 100 TAPER BORE NOZZLE 100T

100T - Specify size when ordering



kg/cm <sup>2</sup>	112.7mm 9309-050			114.0mm 9309-055			115.2mm 9309-060			116.5mm 9309-065			117.8mm 9309-070			119.1mm 9309-075			120.3mm 9309-080			121.6mm 9309-085			122.9mm 9309-090			124.4mm 9309-100		
	L/S	M <sup>2</sup> /H	M	L/S	M <sup>2</sup> /H	M																								
3.0	3.00	0.8	35.5	3.70	13.4	42.8	4.38	15.6	46.1	5.09	18.3	48.8	5.84	21.0	51.4	6.71	24.1	54.5	7.64	27.5	57.5	8.74	31.3	60.5	9.67	34.8	63.4	11.7	42.8	88.1
4.0	3.40	1.2	44.3	4.25	15.3	47.8	5.00	18.0	51.8	5.86	21.1	54.8	6.82	24.6	57.8	7.70	27.8	61.0	8.66	31.3	62.8	10.05	36.2	66.4	11.2	40.4	88.8	13.8	49.5	94.8
5.0	3.79	1.6	49.0	4.70	17.0	52.7	5.59	20.1	56.4	6.59	23.6	60.7	7.67	27.5	64.4	8.66	31.7	66.7	9.8	34.9	69.4	11.36	40.3	92.5	12.5	45.3	94.7	15.5	55.6	100
6.0	4.17	2.0	53.4	5.14	18.9	57.2	6.13	22.1	60.7	7.19	25.9	65.0	8.35	30.1	68.7	9.31	34.3	71.8	10.9	38.2	74.7	12.25	44.5	97.7	13.7	49.5	101	16.8	60.5	109
7.0	4.53	2.4	57.8	5.50	19.9	61.6	6.48	23.8	65.0	7.75	27.9	69.8	9.02	32.3	73.0	10.2	37.0	76	11.7	41.3	79.0	13.1	48.0	102.7	14.8	53.3	105	18.2	65.5	113
8.0	4.89	2.8	62.2	5.84	21.0	65.7	7.07	25.5	69.1	8.25	29.7	73	9.64	34.8	77.3	10.95	39.4	80.7	12.5	44.1	83	14.22	51.7	105.8	15.9	57.2	109	19.5	70.2	118

\*Available only with F100 and SR100

## 100 TAPER RING NOZZLE 100TR

100TR = Body + Cap + 1 Taper Ring  
Specify size when ordering



COMPONENTS:  
Body #9956-001  
Taper Ring #9257-001  
Cap #6745



Flow Path

Kg/cm <sup>2</sup>	16mm 9257-016			17mm 9257-017			18mm 9257-018			19mm 9257-019			20mm 9257-020			21mm 9257-021			22mm 9257-022			23mm 9257-023			24mm 9257-024				
	M <sup>2</sup> /H	M	M	M <sup>2</sup> /H	M	M	M <sup>2</sup> /H	M	M	M <sup>2</sup> /H	M	M	M <sup>2</sup> /H	M	M	M <sup>2</sup> /H	M												
3.5	17.4	69		19.7	71		22.4	74		25.4	77		28.4	79		32.1	82		35.1	83		39.1	86		42.7	89			
4.0	18.7	72		21.2	75		23.9	77		27.1	80		30.4	83		34.5	85		37.6	87		41.9	89		45.8	92			
4.5	19.7	75		22.4	78		25.3	80		28.7	83		32.3	86		36.5	88		39.9	90		44.3	93		48.5	96			
5.0	20.8	77		23.6	80		26.6	83		30.3	86		34.1	88		38.5	91		42.0	93		46.7	96		51.2	99			
5.5	21.8	79		24.7	82		28.0	85		31.8	88		35.7	91		40.3	94		44.2	96		49.0	99		53.8	103			
6.0	22.8	81		25.9	84		29.3	88		33.2	91		37.4	93		42.2	96		46.0	98		51.2	101		56.2	105			
6.5	23.8	84		27.0	87		30.5	90		34.5	93		39.0	96		43.9	98		48.0	101		53.4	104		58.4	107			
7.0	24.7	86		28.0	89		31.6	92		35.8	95		40.4	98		45.5	101		49.9	103		55.4	106		60.6	109			
7.5	25.5	88		29.0	91		32.6	94		37.2	97		41.7	100		47.2	103		51.5	104		57.2	108		62.7	111			

## 100 RING NOZZLE 100R

100R = Body + Cap + Set of 7 Rings  
Specify size when ordering  
Complete set of 7 rings only = #6847



COMPONENTS:  
Body #9956-001  
Ring #6738-001  
Cap #7872



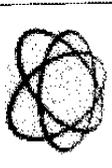
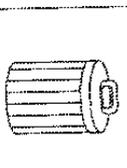
Flow Path

kg/cm <sup>2</sup>	18.0 mm 6738-071			19.5 mm 6738-077			20.6 mm 6738-081			21.8 mm 6738-086			22.7 mm 6738-089			23.6 mm 6738-093			24.5 mm 6738-096		
	L/S	M <sup>2</sup> /H	M																		
3.5	4.66	16.7	67.0	5.38	20.0	69.0	6.36	22.9	70.0	7.24	26.1	73.0	8.10	29.2	76.0	9.45	34.0	78.0	10.6	38.0	79.0
4.0	4.98	17.9	70.6	5.96	21.4	71.8	6.80	24.5	73.6	7.74	27.9	77.3	8.66	31.2	80.3	10.1	36.4	82.3	11.0	40.7	83.0
5.0	5.57	20.0	75.4	6.66	24.0	76.7	7.60	27.4	79.7	8.65	31.2	84.4	9.68	34.8	88.4	11.3	40.7	90.4	12.6	45.5	91.7
6.0	6.10	21.9	79.7	7.30	26.2	82.7	8.33	30.0	85.7	9.46	34.1	88.7	10.6	38.2	91.3	12.4	44.6	94.7	13.8	49.8	97.7
7.0	6.59	23.7	82.0	7.88	28.3	85.0	9.00	32.3	90.0	10.2	36.9	93.0	11.5	41.2	98.0	13.4	48.1	99.0	15.0	53.8	102
8.0	7.04	25.3	84.9	8.43	30.3	89.3	9.67	34.6	94.3	11.0	39.4	97.3	12.3	44.1	99.4	14.3	51.5	100	16.0	57.5	106

Distances are based on 24" nozzle. Big Gun® performance data has been obtained under ideal test conditions and may be adversely affected by wind, poor hydraulic entrance conditions or other factors. Nelson Irrigation Corporation makes no representation regarding diameter, uniformity, or application rate.

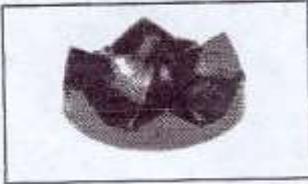
Nelson Irrigation Corporation 848 Airport Rd. Walla Walla, WA 99362 USA Tel: 509.525.7660 Fax: 509.525.7907 E-mail: nelson@nelsonir.com Web site: www.nelsonirrigation.com

Anexo 6.- Catálogo de operación de un cañón de riego

SPRINKLER	DESCRIPTION	MOUNTING	PRESSURE	NOZZLE TYPE	SPACING
<b>R3000</b> 	 The <b>R3000 Rotator</b> features the greatest throw distance available on drop tubes. The wide water pattern from rotating streams equates to lower application rates, longer soak time and reduced runoff. More overlap from adjacent sprinklers improves uniformity.	Up Top or On Drops	15-50 PSI (1-3.4 BAR)	3TN	50-70' (15.2-21.3M)
<b>S3000</b> 	 The <b>Softener Softener</b> utilizes a free-spinning action to produce a gentle, rain-like water pattern. Designed for more sensitive crops and soils, low instantaneous application rates and reduced droplet kinetic energy help maintain proper soil structure.	On Drops	10-20 PSI (7-1.4 BAR)	3TN	42-54' (12.8-16.5M)
<b>D3000</b> 	 The <b>D3000 Sprayhead</b> is a fixed spray designed with future needs in mind. As irrigation requirements change throughout the season, the D3000 features a flip-over cap to change spray patterns. The D3000 is easily convertible to LEPA or other 3000 Series sprinklers.	Up Top or On Drops	6-40 PSI (.41-2.8 BAR)	3TN	16-40' (4.9-12.2M)
<b>N3000</b> 	 The <b>N3000 Nettec</b> combines a spinning action with a continuously offset plate axis for a highly uniform pattern even in the wind. Larger wind-penetrating droplets and low trajectory angles reduce wind exposure for maximum application efficiency.	On Drops (flex hose)	10-15 PSI (7-1 BAR)	3TN	44-48' (13.4-14.5M)
<b>T3000</b> 	 Developed for the land application of wastewater, the <b>T3000 Trashbuster</b> features an open-architecture body design to pass debris more easily. Available with the 3000 F.C., a plug-resistant, flow compensating sprinkler package can simplify maintenance.	Up Top or On Drops	Depends on sprinkler selection	3TN, 3000FC	Depends on sprinkler selection

Correct selection of pressure and sprinkler configuration must be taken into account to optimize droplet size. Nozzle Size, Mounting Height and Hydraulic Conditions.

Anexo 7, diferentes modelos de boquillas de aspersores para pivotes centrales



**RED**  
D6-12° Red Plate  
Low trajectory plate for maximum wind-fighting ability in Spinner, spacing limitations.

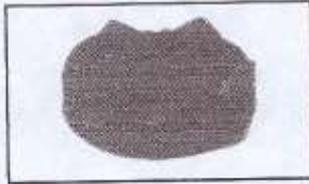
Color	Mounting Position	Trajectory	Pressure Range	Nozzle Range
RED	Drops	12°	10-20 PSI .70-1.4 BAR	3TN #12-#50 <small>Note: PSI limits with small nozzles.</small>



Throw Distance Data 6' (1.8 M) Riser Height.  
Coverage @ 15 psi (1.0 BAR) #36 3TN Nozzle.  
(No wind test.)



Throw Distance Data 3' (.9 M) Riser Height.  
Coverage @ 15 psi (1.0 BAR) #36 3TN Nozzle.  
(No wind test.)



**PURPLE**  
D6-20° Purple Plate  
All around performer; high uniformity, wind-fighting ability and good overlap.

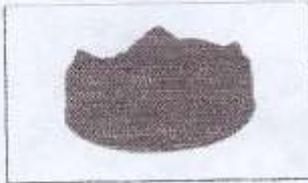
Color	Mounting Position	Trajectory	Pressure Range	Nozzle Range
PURPLE	Drops	20°	10-20 PSI .70-1.4 BAR	3TN #12-#50 <small>Note: PSI limits with small nozzles.</small>



Throw Distance Data 6' (1.8 M) Riser Height.  
Coverage @ 15 psi (1.0 BAR) #36 3TN Nozzle.  
(No wind test.)



Throw Distance Data 3' (.9 M) Riser Height.  
Coverage @ 15 psi (1.0 BAR) #36 3TN Nozzle.  
(No wind test.)



**GRAY**  
D6-35° Gray Plate  
High trajectory, for maximum throw and overlap; high uniformity

Color	Mounting Position	Trajectory	Pressure Range	Nozzle Range
GRAY	Drops	35°	10-20 PSI .70-1.4 BAR	3TN #12-#50 <small>Note: PSI limits with small nozzles.</small>



Throw Distance Data 6' (1.8 M) Riser Height.  
Coverage @ 15 psi (1.0 BAR) #36 3TN Nozzle.  
(No wind test.)



Throw Distance Data 3' (.9 M) Riser Height.  
Coverage @ 15 psi (1.0 BAR) #36 3TN Nozzle.  
(No wind test.)

The flow data was obtained under ideal test conditions and may be adversely affected by poor hydraulic entrance conditions, turbulence or other factors. Nelson Irrigation makes no representation regarding sprinkler flow rate accuracy under various plumbing and drop pipe conditions.

**WARRANTY AND DISCLAIMER**

Nelson R2000 Rotator™ are warranted for one year from date of original sale to be free of defective materials and workmanship when used within the working specifications for which the product was designed and under normal use and service. The manufacturer assumes no responsibility for installation, removal or unprofessional repair of defective parts. The manufacturer's liability under this warranty is limited solely by replacement or repair of defective parts and the manufacturer will not be liable for any crop or other consequential damages resulting from defects or breach of warranty. THIS WARRANTY IS EXPRESSLY IN LIEU OF ALL OTHER WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING THE WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR PARTICULAR PURPOSES AND OF ALL OTHER OBLIGATIONS OR LIABILITIES OF MANUFACTURER. No agent, employee or representative of the manufacturer has authority to waive, alter or add to the provisions of this warranty, nor to make any representations or warranty not contained herein. This product may be covered by one or more of the following U.S. Patent Nos. 4796811, 4833823, D5312845, 5415348, 5409168 and other U.S. patents pending or corresponding issued or pending foreign patents.

Anexo 8. Disposición y forma de mojamiento de un spinner en pivote central

Familias de curvas de velocidad de infiltración de acuerdo al USDA

$$VI = D * T^m$$

D = velocidad de infiltración (mm/hr) en el primer minuto

m Pendiente de la curva

T, tiempo en minutos

Textura	Familia	D	m
Arcillosa	0,05	19,778	-0,382
	0,1	24,581	-0,339
	0,15	29,137	-0,317
Fco Arcillosa	0,2	32,596	-0,301
	0,25	36,534	-0,289
	0,3	39,943	-0,280
	0,35	43,552	-0,271
	0,4	46,986	-0,264
Franco	0,45	50,308	-0,258
	0,5	53,676	-0,252
	0,6	60,000	-0,243
	0,7	66,320	-0,234
Fco Arenosa	0,8	72,353	-0,227
	0,9	78,243	-0,221
Arenosa	1	84,121	-0,215
	1,5	109,495	-0,201
	2	133,465	-0,192

Anexo 9. Familiar de curvas utilizadas por el USDA. El número de familia representa la velocidad de infiltración básica posible de obtener ( en pulgadas/hora)

## **BIBLIOGRAFIA**

- Benami, A., y Ofen, A. 1984. Irrigation engineering. IIIC. IESP. Israel. 257 p.
- Becerra, F (1995).- Diseño manejo y Mantención del pivote central y sus perspectivas para Chile. Tesis Facultad de Ingeniería Agrícola
- CIDIAT. 1982. Manual de riego por aspersión. Serie Riego y Drenaje RD-28. 135 p.
- D'At de Sanint – Foulc, J. 1972. El riego por aspersión. Editores Técnicos Asociados. Barcelona. 252 p.
- Evans , R. (2000) Center Pivot Irrigation (Draft) revans @wsu.edu.
- Hurd, C.J. 1969. Guía para el riego por aspersión. AID. 90p.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (1997) Manual para diseño de zonas de riego pequeñas s.n.p.
- Misión Técnica de Israel. 1975. Riego por aspersión. Criterios de diseño y problemas específicos. Desarrollo Integral de La Joya. Arequipa, Perú, 47p (miograf).
- Pizarro, F. 1987. Riegos localizados de alta frecuencia. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 459p.
- Rolland L. (1986). Mecanización del riego por aspersión. FAO Roma
- Tarjuelo, J. M. Y Benito, M. (1999) El riego por aspersión y su tecnología. Mundi prensa