



Análisis técnico-económico para selección de aspersores

Eduardo A. Holzapfel¹, Ximena M. Pardo², Vital P. da S. Paz³, Antonieta Rodrigues², Ximena C. Orrego² & Marco A. Lopez⁴

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue estudiar los antecedentes técnicos y económicos que deben ser considerados para la selección de aspersores. Para llevar a cabo el proceso se realizó el análisis de diversos factores tales como, velocidad de aplicación, tiempo de riego, velocidad del viento, patrón de distribución y presión de trabajo. Además los costos de adquisición, energía y operación del sistema. También fueron considerados de los resultados se puede concluir que el patrón de distribución es el factor más importante en los costos fijos, debido a que está asociado al número de aspersores. En el caso de los costos variables el caudal y la presión de trabajo son los factores más importantes a considerar. El viento influye en el número de aspersores y por ende el caudal total a utilizar. El tiempo de riego disponible influye en el caudal y en las horas de operación lo que tiene efecto sobre los costos totales.

Palabras clave: riego, economía, aspersión

Technical and economical analysis for sprinkler selection

ABSTRACT

The objective of this research was to study the technical and economical aspects to be considered for sprinkler selection. To accomplish this an analysis was performed of different factors such as rate of water application, available time for irrigation, wind velocity, distribution pattern and pressure. In addition, the price of the sprinklers and the energy and operational cost were considered. The results show that the distribution pattern is the most important factor that affects the fixed costs, basically due to the number of sprinklers. The variable cost is mainly affected by the discharge and working pressure of the sprinklers. The wind factor affects the number of sprinklers per unit area and the total discharge. The time available for irrigation has an important effect upon the required discharge and seasonal time of operation, which affects the total costs.

Key words: irrigation, economy, sprinkler

¹ Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción, Avda. Vicente Méndez, 595, Casilla 537, Chillan, Chile. E-mail: eholzapf@udec.cl

² Ingeniero Civil Agrícola, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción, Avda. Vicente Méndez, 595, Casilla 537, Chillan, Chile.

³ Centro de Ciencias Agrárias, Ambientais e Biológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. CEP 44380-000, Cruz das Almas, BA, Brasil. E-mail: vitalpaz@ufrb.edu.br

⁴ Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción, Avda. Vicente Méndez, 595, Casilla 537, Chillan, Chile.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el agua es un recurso que se encuentra en una condición crítica, debido al deterioro en su calidad y su escasa disponibilidad, esto por la gran demanda de sus múltiples usuarios como son las industrias, ciudades, energía y agricultura, siendo en esta última utilizada en forma consuntiva y en mayor porcentaje. Por ello es un recurso altamente competitivo y que presenta cada vez más riesgos de deterioro en cuanto a calidad por la misma contaminación que ocasionan los usuarios.

Debido a esto surge la necesidad de perfeccionar el manejo y el diseño de los sistemas de riego. Dentro de los sistemas presurizados el riego por aspersión cumple con una reposición oportuna y eficiente del agua, lo que se traduce en un buen rendimiento del cultivo.

El sistema de riego por aspersión es una técnica de riego donde el agua es aplicada en forma de lluvia sobre la superficie a regar, distribuyéndose por el aire, mediante chorros de agua que producen un círculo de suelo humedecido por el ángulo de giro de cada aspersor (Barrientos, 1999; Jara & Holzapfel, 2000). Este método de riego es empleado en diversos cultivos, y bajo diferentes condiciones de suelo y topografía. En general tiene alta eficiencia, sin embargo, sus costos de implementación y operación son elevados (Arqueros, 1978; Moraga, 1996; Espinoza, 1999).

Las características del aspersor y su comportamiento físico determinarán el éxito en la uniformidad de aplicación del agua, de ahí la importancia de una buena selección de este componente (Zazueta, 1992).

El viento es un parámetro importante por lo que se debe tener informaciones precisas de su velocidad, ya que afecta la eficiencia de aplicación. Ningún sistema de riego es capaz de aplicar agua con perfecta uniformidad. En general el aumento de la uniformidad de distribución del agua requiere inversiones en el sistema, manutención y mano de obra para el manejo racional de riego (Heermann et al., 1992). Para un determinado sistema de riego por aspersión, un aumento de la uniformidad de aplicación es posible incrementando los costos en capital y operación. Por lo que, en base al aspecto económico ciertos niveles de uniformidad son aceptables para cada tipo de riego (Peri et al., 1979; Walker, 1979). Según Tarjuelo (1999) los beneficios económicos del riego aumentan en función del aumento de la uniformidad, independiente del costo del agua.

Sin embargo, la eficiencia del riego por aspersión no pasa sólo por una buena aplicación del agua sino también por un correcto diseño, es decir, en la selección adecuada de sus principales componentes como son las tuberías y . En la elección de un aspersor actualmente sólo son considerados como parámetros para su selección la velocidad de aplicación, tomando como base la velocidad de infiltración del suelo y su patrón de distribución. Sin embargo, este análisis no asegura que el aspersor seleccionado sea el más adecuado, ya que se están omitiendo ciertos antecedentes como son los costos de operación e implementación, que muchas veces pueden ser una variable decisiva al momento de elegir entre varias alternativas de sistemas de riego.

Por lo expuesto el objetivo fue estudiar los aspectos técnico-económicos que deben ser considerados en el procedimiento para seleccionar de manera adecuada los aspersores.

MATERIAL Y MÉTODOS

Para cumplir con los objetivos propuestos de establecer una metodología para la selección de aspersores se consideró tomar una sola marca, que evite incorporar elementos de distorsión en el análisis de costo. Para ello se obtuvo el apoyo de Rain Bird con todos sus modelos, distribuidos por Cosmoplas en Chile. Sin embargo, los procedimientos de selección desarrollada en este estudio pueden ser considerados para otros tipos de aspersores.

Para efectos de análisis de los costos y facilitar los cálculos posteriores, se consideró una superficie de una hectárea.

Análisis de la velocidad de aplicación del aspersor

De los modelos de aspersores disponibles de marca Rain Bird, se preseleccionaron todos los aspersores que tuvieran una velocidad de aplicación relacionada con la velocidad de infiltración de suelos típicos de la zona central de Chile.

Tiempo de riego disponible

Una vez satisfecha la restricción de velocidad de aplicación se analiza el tiempo de riego, es decir, el tiempo útil que se dedica al riego propiamente tal, pues al variar este factor puede influir en el número de aspersores y en la velocidad de aplicación. Este factor afecta el área mínima a regar, que determina el número de aspersores que funcionan en forma simultánea.

Efecto del viento

Otro factor a analizar son las condiciones del viento, que afecta el arreglo en los diferentes tipos de aspersores. Esto indica que el ajuste del patrón de distribución y de posición es muy variable, dependiendo de la velocidad del viento.

Patrón de distribución del aspersor

Luego de analizar las condiciones del viento se puede determinar para cada aspersor preseleccionado su patrón de distribución, el cual señalará el espaciamiento entre y sobre laterales en la superficie a regar y por consiguiente obtener el número de aspersores por lateral y hectárea, que tiene directa incidencia en el costo fijo.

Cálculo del costo fijo

Para el análisis del costo fijo la tasa de interés anual (real) fue del 12%, cuyo valor puede fluctuar entre un 5 y 18%. Además se consideró una vida útil del aspersor de 5 años y que puede variar entre 3 a 10 años. Por lo tanto, el costo fijo anualizado queda expresado por:

$$CF = CA FRC \quad (1)$$

donde:

CF – costo fijo, \$ año⁻¹

CA – costo unitario, \$
FRC – factor de recuperación de capital

$$FRC = \frac{i(i+1)^n}{(i+1)^n - 1} \quad (2)$$

donde:

i – tasa de interés anual real
n – vida útil del aspersor (años)

Presión de trabajo

Luego de conocer el número de aspersores se evalúa el costo de operación que tiene cada tipo de aspersor preseleccionado. Para ello es importante conocer el número de aspersores, presión de trabajo, caudal de dicho aspersor y las horas anuales de operación para así obtener los costos de bombeo y determinar el costo variable.

Cálculo del costo variable

En el costo variable o de operación está involucrado en forma implícita el costo anual equivalente de la energía. Además los costos variables deben tomar en cuenta la potencia utilizada por el equipo de acuerdo a la presión de trabajo del aspersor. Cabe destacar que los costos de mantenimiento no se incluyen por considerarse difícil de predecir con certeza.

La Tabla 1 muestra los distintos valores de potencia generada por unidad de combustible que se puede esperar de una unidad de potencia con un buen funcionamiento (Zazueta, 1992).

Tabla 1. Potencia por unidad de combustible (PPUC)

Unidad de Potencia	Potencia generada
Diesel	4,0 HP – h L ⁻¹
Gasolina	2,8 HP – h L ⁻¹
Butano-propano	2,5 HP – h L ⁻¹
Gas natural	3,0 HP – h m ⁻³
Eléctrica	1,2 HP – hr / KW – hr

Fuente: Zazueta, 1992

El costo anual equivalente de la Energía (CEE), considera el factor de costo equivalente de la energía que es función de la tasa de incremento de la energía (e) que para este estudio tomó un valor de 9%, de acuerdo a las proyecciones de variación del diesel; el costo del diesel que tiene un valor de 255 pesos por litro al momento del estudio; el número de horas de operación; la eficiencia de la bomba y la potencia generada por unidad de fuente energética. La CEE tiene la siguiente expresión (Zazueta, 1992):

$$CEE = \frac{To Cc FEE}{Eb PPUC} \quad (3)$$

donde:

CEE – costo anual equivalente de la energía, \$ año⁻¹
To – número de horas de operación por año, h año⁻¹
Cc – costo del combustible o energía, \$ L⁻¹, \$ KW⁻¹

Eb – eficiencia de la bomba, decimal
PPUC – potencia generada por unidad de combustible, HP-h L⁻¹, HP-h k W-h⁻¹)
FEE – factor de costo equivalente de energía (decimal)

$$FEE = \left[\frac{(1+e)^n - (1+i)^n}{(1+e) - (1+i)} \right] \left[\frac{i}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (4)$$

donde (e) es la tasa anual de aumento de costos de energía.

En el cálculo del costo variable (CV) también hay que considerar el caudal y la altura dinámica total que incluye la presión de operación de los aspersores, las pérdidas de carga asociadas al sistema de distribución, energía consumida y la diferencia de cota. Por lo tanto, el costo variable (CV) queda expresado de la siguiente manera:

$$CV = \frac{CEE Q H_T}{102} \quad (5)$$

donde:

CV – costo variable, \$ año⁻¹
Q – caudal del aspersor o de un grupo de aspersores, L seg⁻¹
CEE – costo anual equivalente, \$ año⁻¹
H_T – altura dinámica total, m.c.a.

Selección del aspersor

Una vez obtenidos los costos de implementación y costos de operación se obtiene el costo total (CT) para cada tipo de aspersor, a través de la sumatoria de los costos fijos (CF) y de los costos variables (CV) desde la siguiente relación:

$$CT = CF + CV \quad (6)$$

Sobre la base de estos factores se realizó un análisis para la selección adecuada del aspersor, el cual resultará ser el menor valor del costo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de los resultados se realizó considerando la velocidad de aplicación, el tiempo de riego disponible, la velocidad del viento, el patrón de distribución y la presión de trabajo. El evaluar cada uno de estos parámetros es importante, para así conocer su comportamiento frente a los costos asociados a la operación e implementación.

Tiempo de riego disponible y velocidad de aplicación

Al existir restricción en el tiempo de riego se debe buscar un aspersor que entregue un caudal mayor en menos tiempo, lo que implica un aumento de la velocidad de aplicación, considerando que ésta cumpla con la restricción de velocidad de infiltración del suelo, para que el escurrimiento o apozamiento de agua no signifique un problema crítico. Otra alternativa es evaluar un aspersor con igual velocidad de aplicación, pero aumentando el espaciamiento entre aspersores (arreglo) para

así obtener un menor número de aspersores y ajustarse al tiempo de riego disponible.

Para analizar el efecto del tiempo de riego disponible en el área mínima a regar y los costos de implementación se seleccionaron aspersores de presión media (Tabla 2). Los resultados permiten verificar que una disminución en las horas disponibles para riego produce un incremento en el área mínima a regar y por consecuencia en el número de aspersores, debido a la necesidad de cubrir una mayor superficie de riego en menor tiempo.

Tabla 2. Tiempo de riego disponible y su efecto en el costo de implementación de riego por aspersión

Aspersor de Presión Media (Modelo: 30 EH (2))						
Arreglo (m ²)	Presión (kPa)	VA (mm h ⁻¹)	Caudal (L seg ⁻¹)	Tiempo de riego (h)	C. Unitario (\$)	Variación %
Tiempo riego disponible (h)	Número de posturas por día	Área mínima regar (m ²)	Numero de aspersores	Caudal total (L s ⁻¹)	Costo fijo (\$ año ⁻¹)	
12 x 18	300	10,19	0,611	6	13.894	-
20	3	563	3	1,6	10.148	-
18	2	626	3	1,8	11.275	11.1
16	2	704	3	2,0	12.685	12.5
14	2	805	4	2,3	14.497	14.3
12	2	939	4	2,7	16.913	16.6

Además desde los resultados de la Tabla 2 se desprende que la disminución del tiempo disponible para riego es un factor importante en el costo fijo; una disminución de 2 h pueden significar aumentos de hasta aproximadamente un 16,6% en los costos fijos. Es importante poner de relieve que existe un incremento no lineal en los costos para una disminución de las horas de riego disponibles, iniciándose con una variación de 11% para las primeras dos horas de reducción hasta un 16% para las últimas en el rango evaluado. Esto se debe a que hay un incremento del área mínima a regar, aumentando el número de aspersores y por ende los costos fijos. Es finalmente necesario poner de relieve que también se debe considerar tipo de arreglo y por ende el número de aspersores al momento de calcular los costos fijos.

Al existir restricción en el tiempo de riego disponible es adecuado considerar la alternativa de evaluar aspersores con un caudal y velocidad de aplicación mayor. Tomando como base esta premisa se evaluó el efecto de la velocidad de aplicación del riego por aspersión en los costos fijos, variables y totales. Para ello se consideraron aspersores de baja y alta velocidad de aplicación, que cumplan con las condiciones para el análisis, cuyos resultados se entregan en la Tabla 3.

En base a los resultados de la Tabla 3 se observa en ambos grupos de aspersores (baja y alta velocidad de aplicación), que los costos fijos están asociados al tipo de aspersor, su valor unitario y el arreglo que estos presentan y no una relación directa con la velocidad de aplicación. Sin embargo, para el caso del costo variable éste aumenta con un incremento de la velocidad de aplicación y del caudal, de esta manera un aumento del caudal produce un incremento en los costos variables, por lo que el costo total tendrá la misma tendencia del costo variable. Esto permite señalar la gran importancia que tiene en el costo de operación, el aumento del caudal y de la velocidad de aplicación, que son dos de los factores a considerar en el diseño.

Efecto del viento

La influencia del viento se evaluó con relación al efecto que produce este parámetro en los costos del riego por aspersión (Tabla 4).

En general, como se muestra en la Tabla 4, se puede observar que la velocidad del viento produce una disminución del patrón de distribución del aspersor, afectando los costos, para aspersores de baja, media y alta presión (150, 250 y 400 kPa) con sus respectivas características de velocidad de aplicación, caudal, arreglos y radio de mojadura.

Los resultados permiten establecer que un aumento en la velocidad del viento implica un aumento en los costos de implementación, operación y finalmente en los costos totales. Esto debido a que si se disminuye la distancia entre aspersores, aumenta su número por hectárea y por ende el caudal, se incrementa el costo de implementación y operación, que se refleja finalmente en los costos totales. Al analizar los datos obtenidos se puede establecer que una disminución en el porcentaje de traslape de un 30% puede

Tabla 3. Velocidad de aplicación y su efecto en los costos de riego por aspersión

Modelo	Arreglo (m x m)	Presión (kPa)	Núm. Asp por ha	VA (mm h ⁻¹)	Caudal total (L s ⁻¹)	Costo Unit. (\$)	Costo Fijo (\$ ha ⁻¹ año ⁻¹)	Costo Var (\$ ha ⁻¹ año ⁻¹)	Costo Total (\$ ha ⁻¹ año ⁻¹)
Baja Velocidad de Aplicación									
30 IBH (2)	12 x 15	200	56	6,28	17,44	12.477	192.286	350.716	543.002
30 IBWH(1)	12 x 15	200	56	6,50	18,06	13.682	210.859	363.131	573.990
30 EH(2)	12 x 15	200	56	6,56	18,21	13.894	214.136	366.235	580.371
30 EWH (1)	12 x 15	250	56	6,50	18,10	13.221	203.757	453.914	657.671
14070 EH (1)	12 x 18	250	46	6,53	18,02	27.931	358.715	455.854	814.568
Alta Velocidad de Aplicación									
14070 EH(2)	12 x 15	200	56	12,56	35,15	26.513	408.607	701.433	1.110.040
14070 EH (2)	12 X 18	200	46	12,87	35,52	26.513	340.506	719.020	1.059.526
14070 EH (1)	18 x 18	300	31	12,72	35,48	26.513	227.004	1.065.598	1.292.602
70 CSPH (2)	24 x 24	400	17	13,04	35,46	76.526	368.559	1.456.792	1.825.351
70 CWH (1)	24 X 30	500	14	12,44	34,84	73.796	284.331	1.738.663	2.022.395

Tabla 4. Velocidad del viento y su efecto en los costos de riego por aspersión

Viento (m s ⁻¹)	% Reducción Diámetro	Arreglo (m x m)	Radio Moj. (m)	Asp. por ha	Costo Fijo (\$ ha ⁻¹ año ⁻¹)	Costo Var (\$ ha ⁻¹ año ⁻¹)	Costo Total (\$ ha ⁻¹ año ⁻¹)
Aspersor : Baja Presión: 150 kPa (mod. 29 JH (1), Veloc. Aplicación 3.33 mm h ⁻¹ , Costo Unitario \$11.910)							
2	-	12 x 12	11,20	69	229.432	138.777	368.209
6	12	12 x 9.3	9,85	90	297.343	181.007	478.350
9	20	6 x 15	8,96	108	356.814	217.209	574.023
11	30	6 x 12	7,84	141	465.840	283.578	749.418
Aspersor:Media Presión: 250 kPa (mod. 30IBWH (1), Veloc. Aplicación 6.05 mm h ⁻¹ , Costo Unitario \$ 13.682)							
2	-	18 x 18	15,40	31	117.686	594.029	711.686
6	12	18 x 14	13,55	40	151.815	766.489	918.304
9	20	12 x 18	12,32	48	182.178	919.787	1.101.965
11	30	12 x 13,2	10,78	63	239.109	1.207.220	1.446.329
Aspersor : Alta Presión: 400 kPa (mod. 70 CWH (1), Veloc. Aplicación 11,91 mm h ⁻¹ , Costo Unitario \$ 73.796)							
2	-	24 x 24	22,70	17	348.007	1.303.031	1.651.038
6	12	24 x 18	19,97	23	470.833	1.762.925	2.233.758
9	20	18 x 20	18,16	27	552.717	2.069.520	2.622.238
11	30	18 x 15	15,89	36	736.956	2.759.361	3.496.317

eleva los costos fijos, variables y totales hasta en un rango de 203 %. Por lo tanto la velocidad del viento es un parámetro muy importante de analizar y de considerar en el diseño, ya que afecta directamente los costos.

Análisis de patrón de distribución del aspersor

El tipo de arreglo es primordial para calcular el número de aspersores a considerar y cumplir con los requerimientos de riego. Para ello se aumentó el espaciamiento del patrón de distribución, manteniendo constante la presión y velocidad de aplicación. Los resultados se muestran en la Tabla 5.

En base a los resultados (Tabla 5), se puede establecer que un aumento en el patrón de distribución influye los costos fijos, ya que al existir una mayor distancia entre aspersores y laterales, disminuye el número de aspersores por hectárea y sus costos de implementación. Un aumento en un 25% (aspersor: presión 200 kPa; 12 x 15) en la distancia entre aspersores disminuye los costos fijos en un 12.6%, de la misma forma si aumenta la distancia entre aspersores en un 50% (aspersor presión: 250 kPa; 12 x 18) se disminuirá los costos fijos en un 43.2%. Esto significa que los costos fijos están directamente relacionados con el patrón de distribución y queda claramente reflejado en los resultados.

En el caso de los costos variables para una misma presión de operación, no hay variación debido a que solo están influenciados por el caudal, que se mantiene relativa-

mente constante. Se puede concluir que una variación en el espaciamiento entre aspersores y laterales tiene una mayor incidencia en los costos de implementación y que no afecta los costos de operación. De acuerdo a estos resultados es posible considerar esta alternativa también como solución a la restricción del tiempo de riego disponible, aumentando el área de cubrimiento y reduciendo costos.

Además, se evaluaron aspersores de diferentes presiones de trabajo (150, 200 y 300 kPa), donde en cada caso se varió el patrón de distribución manteniendo relativamente constante presión y caudal. Los resultados se muestran a continuación en la Tabla 6.

Se puede establecer que un mayor distanciamiento entre aspersores y laterales significa una disminución en los costos fijos, la cual está dada por la disminución del número de los aspersores, pudiéndose notar además que las diferencias de costo unitario entre ellos no es significativa. Así al aumentar el patrón de distribución en rangos de 25 a 233% se producen variaciones en los costos fijos en rangos de 12,6 a 52,4% respectivamente.

En el caso de los costos variables hay que considerar la velocidad de aplicación y los tiempos de riego, que repercuten en el costo de operación anual del equipo. Así por ejemplo en el caso de los aspersores de 300 kPa se aumentó en un 33% el área de cubrimiento de los aspersores, disminuyendo en un 1,4% los costos variables, sin embargo para aspersores de 200 kPa se aumentó en un 25% el área de cubrimiento sin provocar un incrementando en los costos variables.

Tabla 5. Tipo de arreglo para un caudal específico y su efecto en los costos de riego por aspersión

Modelo	Arreglo (m ²)	Núm. Asp por ha	VA (mm h ⁻¹)	Caudal total (L s ⁻¹)	Costo Unit. (\$)	Costo Fijo (\$ ha ⁻¹ año ⁻¹)	Costo Var (\$ ha ⁻¹ año ⁻¹)	Costo Total (\$ ha ⁻¹ año ⁻¹)
Aspersor: Presión = 200 kPa								
29 JH (1)	12 X 12	69	3,89	10,833	11.910	229.432	217.258	446.690
30 EWH (1)	12 X 15	56	3,89	10,778	13.221	203.757	217.258	421.015
Aspersor: Presión = 250 kPa								
20 JH (1)	12 X 12	69	5,42	15,069	11.910	229.432	378.262	607.693
30 WH (1)	12 X 18	46	5,42	15,046	12.477	160.238	378.262	538.500

Tabla 6. Tipo de arreglo y su efecto en los costos de riego por aspersión para diferentes presiones de operación del aspersor

Modelo	Arreglo (m ²)	Núm. Asp por ha	VA (mm h ⁻¹)	Caudal total (L s ⁻¹)	Custo Unit. (\$)	Costo Fijo (\$ ha ⁻¹ año ⁻¹)	Costo Var (\$ ha ⁻¹ año ⁻¹)	Costo Total (\$ ha ⁻¹ año ⁻¹)
Aspersor: Presión = 150 kPa								
14 WH (1)	6 x 9	185	2,59	7,19	6.805	349.610	108.629	458.239
29 JH (1)	12 x 12	69	2,57	7,14	11.910	229.432	107.659	337.091
Aspersor: Presión = 200 kPa								
29 JH (1)	12 x 12	69	3,89	10,80	11.910	229.432	217.258	446.690
30 EWH (1)	12 x 15	56	3,89	10,88	13.221	203.757	217.258	421.015
Aspersor: Presión = 300 kPa								
70 CSPH (2)	18 x 24	23	13,13	36,23	76.526	491.412	1.099.868	1.591.280
70 CSPH (2)	24 x 24	17	12,93	35,18	76.526	368.559	1.083.865	1.452.424

Esto establece que el aumento de la distancia de los aspersores entre y sobre laterales influirá en los costos, deduciéndose que la reducción de los costos totales está en gran medida influenciada por la disminución del número de aspersores y del caudal.

Efecto de la presión de trabajo

La presión de trabajo de un aspersor es fundamental en los costos de operación. Para el análisis de este parámetro se evaluaron diferentes aspersores, donde en cada caso se varió su presión de trabajo, manteniendo relativamente constante el arreglo, caudal y velocidad de aplicación. Los resultados se muestran en la Tabla 7.

Es posible establecer que el aumento de la presión de trabajo influye en forma sustantiva en los costos variables. Al considerar por ejemplo un incremento de presión de un 50% (caso 1), los costos variables aumentaron en casi un 50%. Esto significa que los costos variables tienen una relación directa con la presión de trabajo del aspersor. Así se puede inferir que aspersores con una menor presión de trabajo tienen costos variables menores y en consecuencia un menor costo total para condiciones similares de velocidad de aplicación.

En el caso de los costos fijos, estos dependen directamente del costo unitario del aspersor, para arreglos homogéneos, quedando de manifiesto que no existe relación entre las características de presión de trabajo del aspersor y los costos fijos. Esto indica que el valor unitario de un aspersor está condicionado por otros factores, como el número y tamaño de boquillas y por el tipo de material. Finalmente es importante destacar que los costos totales tienen una marcada influencia de los costos variables e indirectamente por la presión de trabajo del aspersor.

Metodología de selección

Basado en los antecedentes previamente descritos se ha establecido un procedimiento para la selección del aspersor, el cual se describe a continuación:

1. Considerando la velocidad de infiltración del suelo, se preseleccionan los aspersores cuya velocidad de aplicación (VA) sea menor o igual a la velocidad de infiltración de diseño (VI);
2. Cumplida la restricción anterior se analiza el tiempo de riego (Tr), es decir, si existe limitación en las horas de riego se considera la alternativa de buscar otros aspersores con mayor velocidad de aplicación, evaluando las condiciones impuestas en el punto 1;
3. Al no existir restricción en las horas de riego se procede a evaluar el efecto del viento; una velocidad de viento mayor a 2 m s⁻¹ requiere reducir el espaciamiento de los aspersores, según el patrón de distribución en función del viento;
4. Una vez determinado el espaciamiento adecuado a las condiciones del viento se obtendrá el patrón de distribución el cual indica el número de aspersores por unidad de superficie de acuerdo a los requerimientos necesarios;
5. Con el costo unitario del aspersor, número de aspersores, tasa de interés anual real y la vida útil se obtiene el costo fijo anual (CF) por unidad de superficie;
6. Posteriormente considerando el costo anual equivalente de la energía, presión de trabajo y caudal, se determina el costo variable (CV) o de operación anual, donde implícitamente está involucrado el costo del combustible o energía, eficiencia de la bomba, potencia generada por unidad de combustible, las horas de operación del equipo y el factor de costo equivalente de energía;
7. El costo total anual (CT) es la sumatoria del costo fijo más el costo variable de los aspersores;

Tabla 7. Presión de operación y su efecto en los costos en riego por aspersión

Modelo	Presión (kPa)	Caudal (L s ⁻¹)	Arreglo (m ²)	Núm. Asp por ha	VA (mm h ⁻¹)	Custo Unit. (\$)	Costo Fijo (\$ ha ⁻¹ año ⁻¹)	Costo Var (\$ ha ⁻¹ año ⁻¹)	Costo Total (\$ ha ⁻¹ año ⁻¹)
Caso 1									
30 EWH (1)	200	0,35	12 x 15	56	6,94	13.221	203.757	387.916	591.718
30 IBWB (1)	300	0,35	12 x 15	56	6,94	13.682	210.859	581.941	792.800
Caso 2									
14070 H (2)	250	1,04	18 x 18	31	11,60	26.513	227.004	810.407	1.037.410
14070 H (2)	350	1,02	18 x 18	31	11,33	26.513	227.004	1.107.412	1.334.416

8. Finalmente se selecciona el aspersor con menor costo total.

En la Figura 1 se presenta el diagrama de flujo de la secuencia para la selección del aspersor.

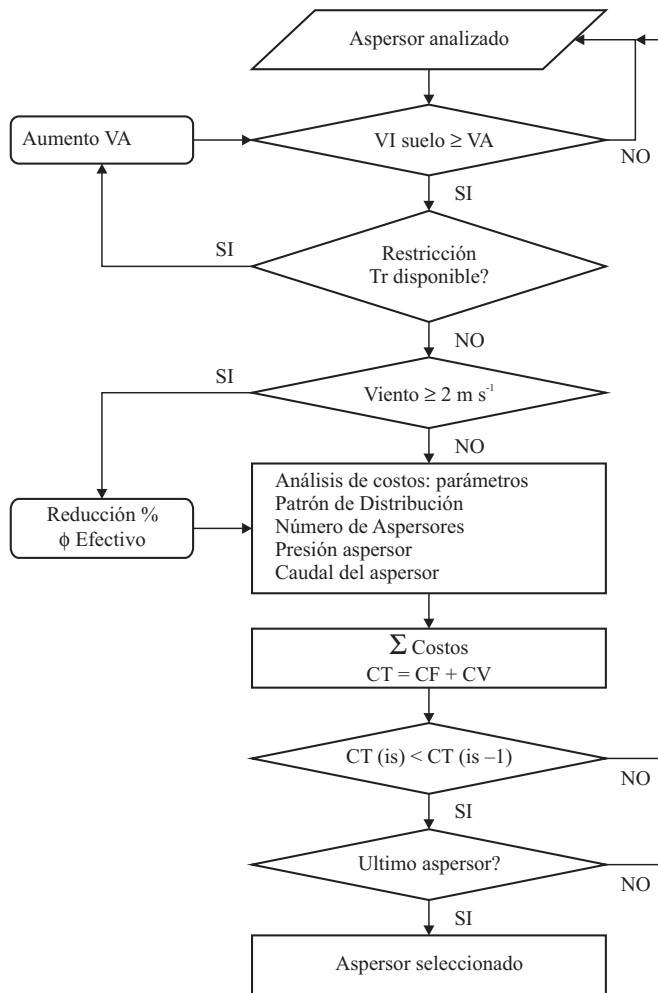


Figura 1. Diagrama de flujo para la selección de aspersor

CONCLUSIONES

1. El costo fijo o de implementación está principalmente influenciado por el patrón de distribución, ya que éste define el número de aspersores a utilizar de acuerdo a los requerimientos.

2. En los costos variables o de operación los factores más influyentes son el caudal y la presión de trabajo.

3. Los costos variables tienen una marcada influencia en los costos totales e indirectamente afectados por la presión de trabajo del aspersor.

4. La velocidad del viento es importante de considerar y

está relacionada a una disminución del espaciamiento entre y sobre laterales, según su condición, aumentando el número de aspersores y por ende el caudal, afectando a los costos fijos y costos variables respectivamente.

5. El tiempo de riego disponible es decisivo en los costos fijos, pues su reducción puede significar un aumento notable en los costos de implementación y en el caso de los costos variables influyen directamente en las horas de operación del equipo.

El considerar los factores técnicos y económicos en la selección de los aspersores es de gran importancia en la sustentabilidad del sistema de riego por aspersión.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se realizó bajo el soporte del proyecto Fondef D02I-1146 y el Departamento de Recursos Hídricos de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Concepción. Chillán. Chile.

LITERATURA CITADA

- Arqueros, A. A. Costos de operación del riego por aspersión. Memoria de Título, Ing. Agron. Chillán: Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Agropecuarias. 1978. 83p.
- Barrientos, C. Manual de pequeñas obras de riego. Santiago: INDAP. Ministerio de Agricultura. 1999. 180p.
- Espinoza, S. J. Análisis de riego en papas sector Toltén, IX Región. Proyecto de Título. Chillán: Universidad Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola. Depto. Riego y Drenaje. 1999. 55p.
- Heermann, D. F.; Duke, H. R.; Serafim, A. M.; Dawson, L. L. Distribution functions to represent center-pivot water distribution. Transaction of the ASAE, St. Joseph, v.35, n.5, p.1465-1472, 1992.
- Jara, J.; Holzapfel, E. A. Riego presurizado. Curso Formulación de Proyectos de Aspersión para la Ley n° 18.450. Temuco: Instituto de Investigaciones Agropecuarias 2000. 40p.
- Moraga, G. J. Evaluación de un sistema de riego por aspersión. Proyecto de Título, Chillán: Universidad Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola. Riego y Drenaje. 1996. 82p.
- Peri, G.; Hart, W. E.; Norum, D. I. Optimal irrigation depths – a method of analysis. Journal of Irrigation and Drainage Division. ASCE, New York, v.105, n.4, p.341-355. 1979.
- Tarjuelo, M. J. El riego por aspersión y su tecnología. 2.ed., Madrid: Mundi-Prensa. 1999. 585p.
- Walker, E. R. Explicit sprinkler irrigation uniformity: Efficiency model. Journal of Irrigation and Drainage Division, New York, v.105, n.2, p.129-136. 1979.
- Zazueta, F. R. Sistemas fijos y portátiles de riego por aspersión. México: ICFA Internacional, 1992. 121p.