

Modelo de programación lineal en el diseño de la red de tuberías y costo del sistema de riego por goteo para determinar la superficie mínima de operación en diferentes cultivos en un suelo salino

Linear programming in the design of pipes with drip irrigation for determining optimal minimum size in crops on saline soils

Lía Ramos Fernández¹

Resumen

Las altas inversiones que involucra el uso del riego presurizado lleva a emplear óptimamente los recursos, a fin de maximizar los beneficios y recuperar la inversión en el menor tiempo posible. Para esto, la programación lineal permite optimizar el funcionamiento de la bomba hidráulica en el cabezal de riego con los diámetros económicos de tubería correspondientes, en función de los costos de la tubería y del bombeo. Por ello, el objetivo del presente estudio es determinar la superficie mínima de operación con cultivos de espárrago, vid, tomate, páprika y cebolla, en suelo salino. Se desarrollaron 25 modelos de programación lineal para determinar el costo mínimo del sistema en tamaños de parcela de 50, 20, 15, 10 y 5 ha. Finalmente, se realiza la evaluación económica para definir la superficie mínima de operación según el cultivo evaluado. De los resultados del estudio, se obtienen tamaños de parcela mínimos óptimos de 20 ha para espárrago, 50 ha para vid y 5 ha para tomate, cebolla y ají páprika. De los cinco cultivos propuestos, es la cebolla la que presenta la mayor rentabilidad, seguida, en orden decreciente, del tomate, ají páprika, espárrago y vid. Acorde con el análisis de sensibilidad, para una reducción de un 20 % en el rendimiento, se obtiene que la cebolla sigue siendo rentable en todos los tamaños de parcela; en cambio, para el tomate y ají páprika, solo resultaron rentables en tamaños de parcela de 10, 15, 20 y 50 ha. En el caso de los cultivos de espárrago y vid, ninguno resultó rentable.

Palabras clave: programación lineal; optimización; riego por goteo y diseño de tuberías.

Abstract

Drip irrigation needs high investment and it requires using resources optimally, to maximize profits and recover the on investment in the shortest possible time. For this reason, linear programming optimizes the operation of the hydraulic pump in the irrigation head with economical diameters of pipes, depending on the pipe cost and pumping cost. Thus, the aim of this study is to determine minimal operation surface in crops of asparagus, grapes, tomatoes, paprika and onion in saline soil. Twenty-five linear programming models were developed to determine the minimal cost of the system for parcel sizes of 50, 20, 15, 10 and 5 ha. Finally, the economic evaluation was performed to define the minimum operation area according to the evaluated crop. From the results of the study, we obtain an optimal minimum land size of 20 ha for asparagus, 50 ha for vine and 5 ha for tomato, onion and paprika. The onion has the highest yield followed in decreasing order by tomato, paprika, asparagus and vine. According to sensitivity analysis for a reduction of 20 % in crop yield, we found that the onion is profitable at all land sizes, whereas for tomato and paprika it was profitable only in land sizes of 10, 15, 20 and 50 ha. In the case of asparagus and vine, none was profitable.

Keywords: linear programming; optimization; drip irrigation and pipe design.

1. Introducción

Las altas inversiones que requiere el uso del riego presurizado nos lleva a emplear óptimamente los recursos, a fin de maximizar los beneficios y recuperar la inversión en el menor tiempo posible. Para esto, la programación

lineal permite optimizar el funcionamiento de la bomba hidráulica en el cabezal de riego con los diámetros económicos de tubería correspondientes, en función de los costos de la tubería y del bombeo. Es así que en la selección de los diámetros de una red de tuberías, además

¹ Docente del Departamento de Recursos Hídricos. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima (Perú). Email: liarf@lamolina.edu.pe

de considerar los factores hidráulicos tales como las presiones requeridas, caudales y velocidades máximas permitidas, se debe tener en cuenta los factores económicos tales como el costo de oportunidad del capital, periodo de pago del préstamo, costo unitario de energía y horas de bombeo anual, con el objeto de seleccionar los diámetros de tuberías que produzcan el costo mínimo (Ascencios, 1999; Georgiadis, Schilling, Rotstein y Macchietto, 1999; González-Cebollada y Macarulla, 2012; Swamee y Sharma, 2013). Al respecto, la programación lineal permite obtener el mínimo costo de un sistema de riego a través de una función objetivo que incluye los costos de bombeo y de tubería, los cuales se optimizan de acuerdo a las limitaciones específicas. Las variables de decisión que se utilizan, generalmente, son los diámetros de las tuberías, las pérdidas de carga y las longitudes de tubería; como restricciones, se toma en cuenta las longitudes de la tubería y las cargas piezométricas disponibles, con el fin de cubrir las pérdidas por fricción en la tubería (Ascencios, 1999; Georgiadis *et al.*, 1999; González-Cebollada y Macarulla, 2012). La función objetivo del modelo de optimización está representada por Z con variables de decisión L_{ij} y Ht :

$Minimizar Z = \sum_{i=1}^{NS} \sum_{j=1}^{ND} C_{ij} L_{ij} + CHt$. Donde: C_{ij} es costo unitario anualizado de los tramos de tubería según diámetro (\$/m); L_{ij} es longitud del tramo de tubería según diámetro (m); C es el costo anual de bombeo del sistema (\$/m); Ht es la carga dinámica total (m); ND es el número de diámetros comerciales disponibles en el mercado y NS es el número de tramos en la red.

El costo anualizado de la tubería se obtiene del producto del factor de recuperación del capital (FRC) por el costo unitario de la tubería para un periodo de vida útil (n) en años y un interés bancario (Ascencios, 1999; González-Cebollada y Macarulla, 2012). Cuando la fuente de energía es eléctrica, el costo anual de bombeo del sistema depende de la carga dinámica total, de la eficiencia de la unidad de bombeo, del número de horas anuales de bombeo y del costo unitario de energía; este costo, matemáticamente, está representado por $C = \text{Coeficiente} * Ht$, en que el coeficiente depende de la descarga, la carga dinámica total, la eficiencia de la unidad de bombeo, el número de horas anuales de bombeo y el costo unitario de energía.

La restricción hidráulica permite asegurar la presión mínima (H_{min}) en los nudos de la red con el fin de cubrir las pérdidas por fricción en la tubería y se define por la expresión: $Ht - \sum_{i=1}^{NS} \sum_{j=1}^{ND} J_{ij} L_{ij} \geq H_{min}$. Donde: L_{ij} son los diferentes tramos de recorrido del flujo para cada nudo; J_{ij} es la pérdida de carga por fricción según diámetro a lo largo del recorrido del flujo para cada nudo (m/m).

La restricción geométrica permite asegurar que para cada tramo de tubería, la suma de las longitudes parciales de tubería, con diámetros seleccionados, debe ser igual a su longitud (L_i), esto es: $L_i = \sum_{j=1}^{ND} L_{ij}$. Donde: L_i es la longitud del tramo de tubería i según diámetros seleccionados (m). La tercera restricción del modelo plantea que las

variables de decisión, como la carga dinámica (Ht) y las longitudes de las tuberías L_{ij} no pueden ser negativas, esto es: $L_{ij} \geq 0$; $Ht \geq 0$. Finalmente, la función objetivo asociada con las restricciones forman el modelo de optimización.

El objetivo del presente estudio es determinar la superficie mínima de operación con cultivos de espárrago, vid, tomate, páprika y cebolla; con este fin, se desarrollan modelos de programación lineal para determinar el costo mínimo del sistema en tamaños de parcela de 50, 20, 15, 10 y 5 ha. Finalmente, se realiza la evaluación económica para definir la superficie mínima de operación en los casos evaluados.

2. Materiales y métodos

Zona de estudio

La zona de estudio son parcelas en la Pampa de Villacurı del departamento de Ica, con una altitud de 357 msnm, clima templado-cálido y topografía casi plana, con ligeras pendientes. El suelo es de textura arenosa, con capas duras de sales superficiales de hasta 0,60 m, pero, sometidas a lavado, son cultivadas con éxito. La fuente de agua es la subterránea del acuífero de Ica con buena calidad para el riego (C2S1), no existen problemas, sin embargo, con la salinidad efectiva y el índice de salinidad potencial debido a que el riego es aplicado con alta frecuencia; es decir, no hay posibilidad que ocurra precipitación de sales solubles, por límite de solubilidad, ni disminución en más del 50 % de la humedad aprovechable del suelo. Además, el contenido de cloruros y boro está por debajo de los valores de tolerancia de los cultivos sensibles. Esta información actualizada de la zona, además de datos meteorológicos y de cultivos, fue proporcionada por SENAMHI Ica, el Programa Subsectorial de Irrigaciones (PSI Ica) y la Agencia Agraria Ica.

Metodología

Se realizó la visita de reconocimiento del campo para identificar las parcelas de la zona de estudio, la pendiente, la fuente y calidad del agua, fuente de energía, cultivos y variedades que se adaptaran a las condiciones climáticas y del suelo así como para recopilar información existente de la zona.

Los cultivos considerados fueron espárrago, vid, tomate, páprika y cebolla que se evaluaron para tamaños de parcela de 5, 10, 15, 20 y 50 ha. Por lo que se tendrían 25 combinaciones, producto de los cinco tamaños de parcela por los cinco cultivos seleccionados.

Se trazó la red de la tubería principal y secundaria, en los cinco tamaños de parcela, teniendo en cuenta la ubicación de la fuente de agua. Se estudió la operación del sistema y se diseñó la subunidad típica de riego por goteo en las condiciones más críticas de los cultivos, en las 25 combinaciones de parcelas. El caudal y volumen requeridos por metro de manguera y tiempo de riego se obtiene en función de la máxima evapotranspiración, espaciamiento entre laterales y goteros, número de

goteros por planta y características del gotero. Luego, se determina el tamaño de la subunidad de riego y el caudal y se define el número de posiciones y rotaciones en cada turno de riego. Finalmente, se obtiene el caudal y horas de bombeo de todo el sistema (Bliesner y Keller, 2001). Por la presencia de sales superficiales y operación misma del riego por goteo, se hace necesario un lavado de sales (Bliesner y Keller, 2001).

Se prepararon datos de entrada para formular los 25 modelos de programación lineal: diámetros comerciales disponibles en el mercado, horas de bombeo anual, factor de recuperación del capital para un periodo de vida útil

e interés bancario, costo anual de bombeo del sistema, caudales y presiones requeridas en cada nudo de la red, pérdidas de carga en los tramos de la tubería principal y secundaria. A partir de estos datos, se formularon los 25 modelos de programación lineal para la selección de los diámetros de tubería principal y secundaria que proporcionen los costos mínimos de implementos y operación del sistema.

Se diseñó el cabezal de riego considerando el caudal y pérdida de carga obtenida a la entrada de la red principal del sistema; así pudo definirse el tipo de bomba y motor, los filtros, las válvulas y los accesorios.

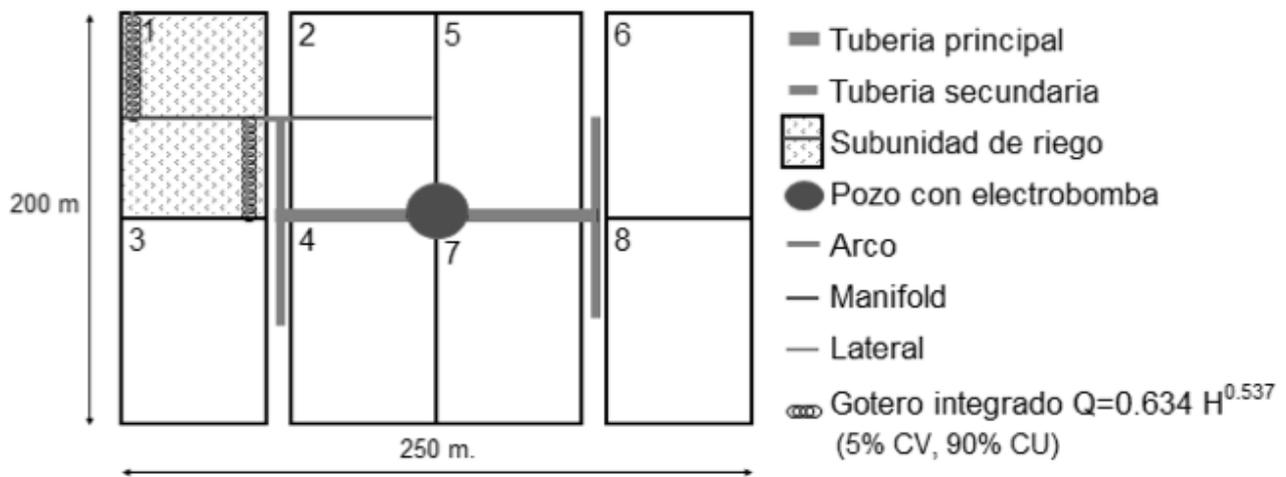


Figura 1. Trazo de la red de tubería principal y secundaria en parcela de 5 ha.

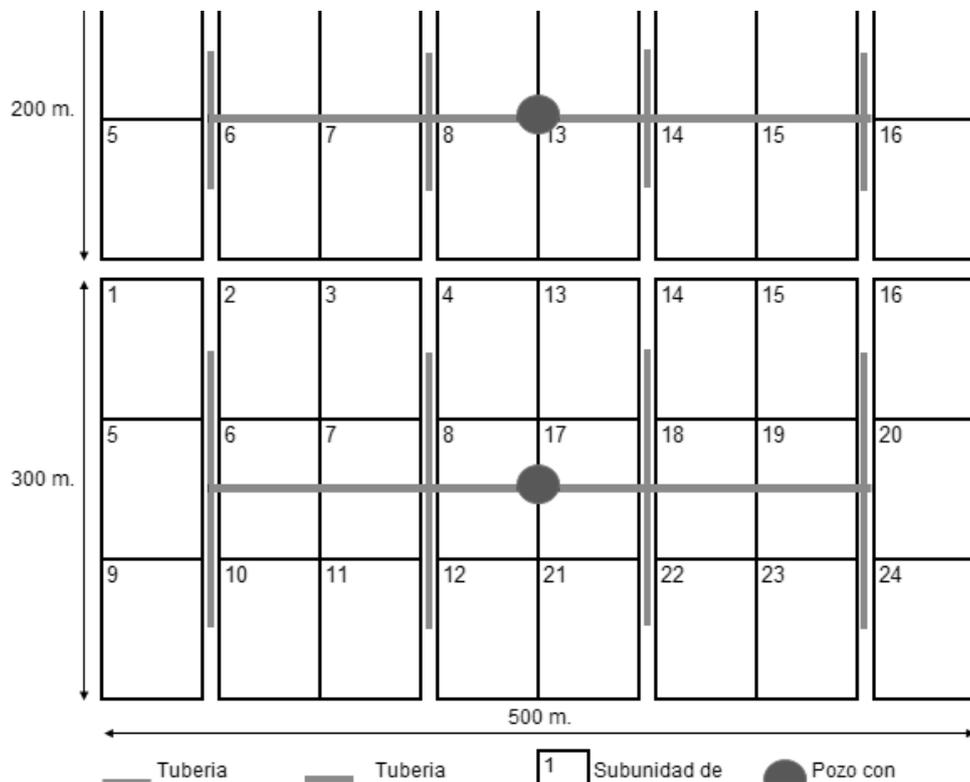


Figura 2. Trazo de la red de tubería principal y secundaria en parcela de 10 ha (panel superior) y 15 ha (panel inferior).

Se realizó la evaluación económica con indicadores de rentabilidad VANE, TIRE y relación B/C para un horizonte del proyecto de 10 años. Como parte de los costos del estudio, se consideraron los del equipo de riego (sistema de riego por goteo, aspersión, tubería de distribución, unidad de bombeo, cabezal de riego, accesorios); los de perforación y desarrollo del pozo; los de bombeo así como los de operación y mantenimiento del sistema. Para el procesamiento de la información se utilizaron los softwares CropWat para Windows, Excel con complemento "Solver", graficador Autocad y procesador de texto Word.

3. Resultados y discusión

Trazo de la red de tubería principal y secundaria

En las **Figs. 1, 2 y 3** se aprecia el trazo de la red de tubería principal y secundaria para los tamaños de parcela seleccionadas (5, 10, 15, 20 y 50 ha). Se consideró la perforación del pozo en el centro de la parcela para obtener una mejor distribución de presiones.

Simulación de la operación del sistema

Los cálculos realizados para definir la operación del sistema se presentan en las siguientes tablas: Evapotranspiración del cultivo, láminas de riego, tiempos de riego, horas de

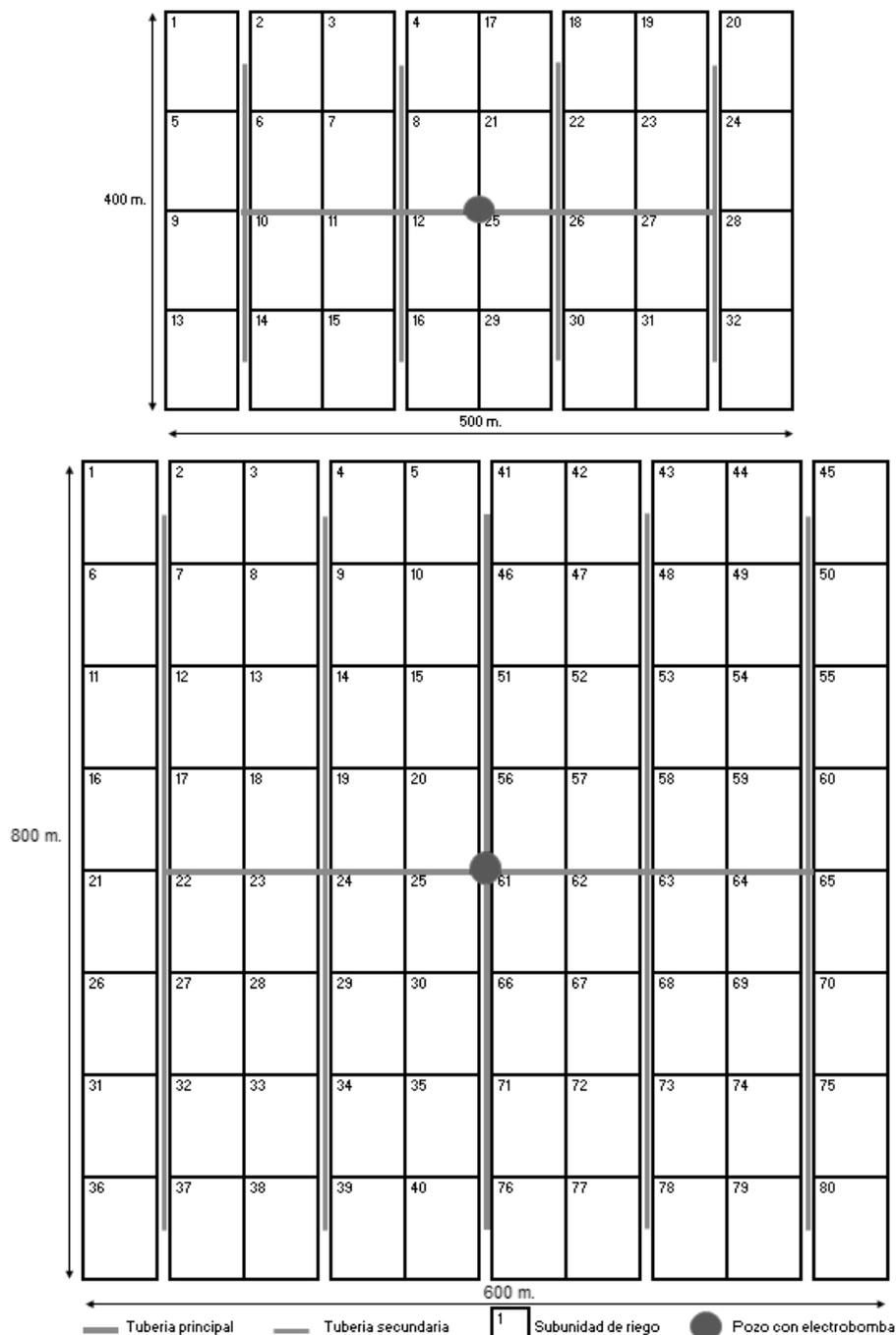


Figura 3. Trazo de la red de tubería principal y secundaria en parcela de 20 ha (panel superior) y 50 ha (panel inferior).

Tabla 1. Evapotranspiración del cultivo, láminas de riego, tiempos de riego y horas de bombeo

DETALLE	UNIDAD	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Eto	mm/d	3,8	4,5	4,4	4,0	3,2	3,1	3,2	3,3	3,5	2,9	3,0	3,5
Espárrago	Kc	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
	ETC mm/d	2,9	3,4	3,3	3,0	2,4	2,3	2,4	2,5	2,6	2,2	2,3	2,6
	Lámina bruta mm/d	3,2	3,8	,7	3,3	2,7	2,6	2,7	2,8	2,9	2,4	2,5	2,9
	Volumen Req m ³ /ha	982	1050	1137	1000	827	775	827	853	875	749	750	904
	Volum req (l/d-m)	6,3	7,5	,3	6,7	5,3	5,2	5,3	5,5	5,8	4,8	5,0	5,8
	T riego (h/d)	1,1	1,3	1,2	1,1	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	0,8	0,8	1,0
	T bombeo para 50, 20, 10, 5 ha (h/d)	8,4	10,0	9,8	8,9	7,1	6,9	7,1	7,3	7,8	6,4	6,7	7,8
	T bombeo para 15 ha (h/d)	6,3	7,5	7,3	6,7	5,3	5,2	5,3	5,5	5,8	4,8	5,0	5,8
	H de bombeo para 50,20,10, 5 ha	262	280	303	267	220	207	220	227	233	200	200	241
	H de bombeo para 15 ha	196	210	227	200	165	155	165	171	175	150	150	181
Vid	Kc	0,6	0,6	0,8	0,6	0,4				0,5	0,5	0,6	0,7
	ETC mm/d	2,3	2,7	3,3	2,2	1,3				1,6	1,5	1,8	2,3
	Lámina bruta mm/d	2,5	3,0	3,7	1,7	1,0				1,8	1,6	2,0	2,5
	Volumen Req m ³ /ha	785	840	1137	5,0	2,3				525	499	600	784
	Volum req (l/d-m)	5,1	6,0	7,3	3,3	1,9				3,5	3,2	4,0	5,1
	T riego (h/d)	0,8	1,0	1,2	0,6	0,3				0,6	0,5	0,7	0,8
	T bombeo para 50, 20, 10, 5 ha (h/d)	6,8	8,0	9,8	4,4	2,6				4,7	4,3	5,3	6,7
	T bombeo para 15 ha (h/d)	5,1	6,0	7,3	3,3	1,9				,5	3,2	4,0	5,1
	H de bombeo para 50,20,10, 5 ha	209	224	303	132	79				140	133	160	209
	H de bombeo para 15 ha	157	168	227	99	60				105	100	120	157
Tomate	Kc	0,6			0,4	0,7	1,1	0,8	0,6	0,4	0,7	1,1	0,8
	ETC mm/d	2,3			1,6	2,2	3,3	2,6	2,0	1,4	2,0	3,2	2,8
	Lámina bruta mm/d	2,5			1,8	2,5	3,6	2,8	2,2	1,6	2,3	3,5	3,1
	Volumen Req m ³ /ha	785			533	772	1085	882	682	467	699	1050	964
	Volum req (l/d-m)	5,1			3,6	5,0	7,2	5,7	4,4	3,1	4,5	7,0	6,2
	T riego (h/d)	0,8			0,6	0,8	1,2	0,9	0,7	0,5	0,8	1,2	1,0
	T bombeo para 50, 20, 10, 5 ha (h/d)	6,8			4,7	6,6	9,6	7,6	5,9	4,1	6,0	9,3	8,3
	T bombeo para 15 ha (h/d)	5,1			3,6	5,0	7,2	7	4,4	3,1	4,5	7,0	6,2
	H de bombeo para 50,20,10, 5 ha	209			142	206	289	235	182	124	186	280	257
	H de bombeo para 15 ha	157			107	154	217	176	136	93	140	210	193
Ají Párika	Kc				0,4	0,7	0,9	1,0	0,9	0,8	0,6	0,5	
	ETC mm/d				1,6	2,2	2,8	3,2	3,0	2,8	1,7	1,4	
	Lámina bruta mm/d				1,8	2,5	3,1	3,6	3,3	3,1	1,9	1,6	
	Volumen Req m ³ /ha				533	772	930	1102	1023	933	599	470	
	Volum req (l/d-m)				1,8	2,5	3,1	3,6	3,3	3,1	1,9	1,6	
	T riego (h/d)				0,3	0,4	0,5	0,6	0,6	0,5	0,3	0,3	
	T bombeo para 50 ha (h/d)				5,9	8,3	10,3	11,9	11,0	10,44	6,4	5,2	
	T bombeo para 20, 10 ha (h/d)				4,7	6,6	8,3	9,5	8,8	8,3	5,2	4,2	
	T bombeo para 15 ha (h/d)				3,6	5,0	6,2	7,1	6,6	6,2	3,9	3,1	
	T bombeo para 5 ha (h/d)				2,4	3,3	4,1	4,7	4,4	4,1	2,6	2,1	
	H de bombeo para 50 ha				178	257	310	367	341	311	200	157	
	H de bombeo para 20, 10 ha				142	206	248	294	273	249	160	125	
	H de bombeo para 15 ha				107	154	186	220	205	187	120	94	
H de bombeo para 5 ha				71	103	124	147	136	124	80	63		

Cebolla	Kc	0,5	0,4	0,7	0,9	1,0	0,6	0,5	0,4	0,7	0,9	1,0	0,6
	ETC mm/d	1,8	1,7	3,0	3,6	32	1,9	1,5	1,2	2,4	2,6	3,0	2,1
	Lámina bruta mm/d	2,0	1,9	3,3	4,0	3,6	2,1	1,7	1,4	2,6	2,9	3,3	2,3
	Volumen Req m ³ /ha	615	518	1031	1200	1102	620	518	421	793	899	1000	723
	Volum req (l/d-m)	2,0	1,9	3,3	4,0	3,6	2,1	1,7	1,4	2,6	2,9	3,3	2,3
	T riego (h/d)	0,3	0,3	0,6	0,7	0,6	0,3	0,3	0,2	0,4	0,5	0,6	0,4
	T bombeo para 50 ha (h/d)	6,6	6,2	11,1	13,3	11,9	6,9	5,6	4,5	8,8	9,7	11,1	7,8
	T bombeo para 20, 10 ha (h/d)	5,3	4,9	8,9	10,7	9,5	5,5	4,5	3,6	7,1	7,7	8,9	6,2
	T bombeo para 15 ha (h/d)	4,0	3,7	6,6	8,0	7,1	4,1	3,3	2,7	5,3	5,8	6,7	4,7
	T bombeo para 5 ha (h/d)	2,6	2,5	4,4	5,3	4,7	2,8	2,2	1,8	3,5	3,9	4,4	3,1
	H de bombeo para 50 ha	205	173	344	400	367	207	173	140	264	300	333	241
	H de bombeo para 20, 10 ha	164	138	275	320	294	165	138	112	212	240	267	193
	H de bombeo para 15 ha	123	104	206	240	220	124	104	84	159	180	200	145
	H de bombeo para 5 ha	82	69	137	160	147	83	69	56	106	120	133	96

* Estación meteorológica PE Hacienda del Sur.

bombeo mensual y anual según tipo de cultivo y tamaño de parcela, para una eficiencia de riego del 90 % (Tabla 1); Caudal del sistema y tiempo de bombeo según cultivo y tamaño de parcela (Tabla 2); Tamaño y caudal de

subunidad de riego: lateral, manifold y arco (Tabla 3).

Finalmente, en la Tabla 4 y en las Figuras de la 4 a la 8, se presenta el número de subunidades que se riegan en forma simultánea y el tiempo de riego diario en las condiciones más críticas.

Tabla 2. Caudal del sistema y tiempo de bombeo

Área (ha)	N° subun	Espárrago		Vid		Tomate		Ají Páprika		Cebolla	
		Q(l/s)	T (h/d)	Q(l/s)	T (h/d)	Q(l/s)	T (h/d)	Q(l/s)	T (h/d)	Q(l/s)	T (h/d)
50	80	50	10	50	10	50	10	40	12	40	13
20	32	20	10	20	10	20	10	20	9	20	11
15	24	20	8	20	7	20	7	20	7	20	8
10	16	10	10	10	10	10	10	10	9	10	11
5	8	5	10	5	10	5	10	10	5	10	5

Tabla 3. Tamaño y caudal de subunidad de riego en parcelas de 5, 10, 15, 20 y 50 ha: lateral, manifold y arco

Detalle		Espárrago Vid	Tomate	Páprika Cebolla	Detalle	Espárrago Vid			Páprika Cebolla		
						Tomate	Páprika	Cebolla	Detalle	Tomate	Páprika Cebolla
Gotero	l/h	2	2	2	Lateral	longitud	m	50	50	50	
Esp. Laterales	m	2	2	1		diámet	mm	16	16	16	
Esp. Goteros	got/m	3	3	3		caudal	l/s	0,08	0,08	0,08	
Esp. Plantas	got/plant	2	1	2	Manifold	longitud	m	60	60	60	
Área subunida	ha	0,6	0,6	0,6		diámet	pulg	2	2	3	
largo	m	100	100	100		caudal	l/s	5	5	10	
ancho	m	60	60	60	Arco	longitud	m	3	3	3	
caudal	l/s	5	5	10		diámet	pulg	2	2	3	
						caudal	l/s	5	5	10	
						presión*	m	13,69	13,69	12,63	

Tabla 4. Operación del sistema

Cultivo	Espárrago, Vid, Tomate					Páprika, Cebolla					
	Tamaño de parcela (ha)	50	20	15	10	5	50	20	15	10	5
Posiciones de riego/día		10	4	4	2	1	4	2	2	1	1
N° de rotaciones		8	8	6	8	8	20	16	12	16	8
N° de subunidades/riego simultáneo		10	4	4	2	1	4	2	2	1	1

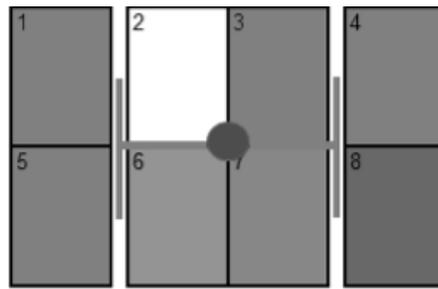


Figura 4. Turnos de riego en parcela de 5 ha: 1 subunidad por riego simultáneo.

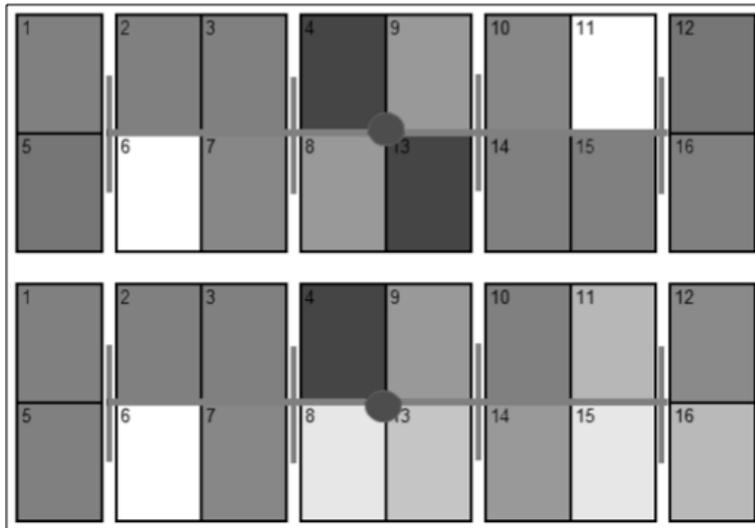


Figura 5. Turnos de riego en parcela de 10 ha. Panel superior: 2 subunidades por riego simultáneo en espárrago, vid y tomate. Panel inferior: 1 subunidad por riego simultáneo en páprika y cebolla.

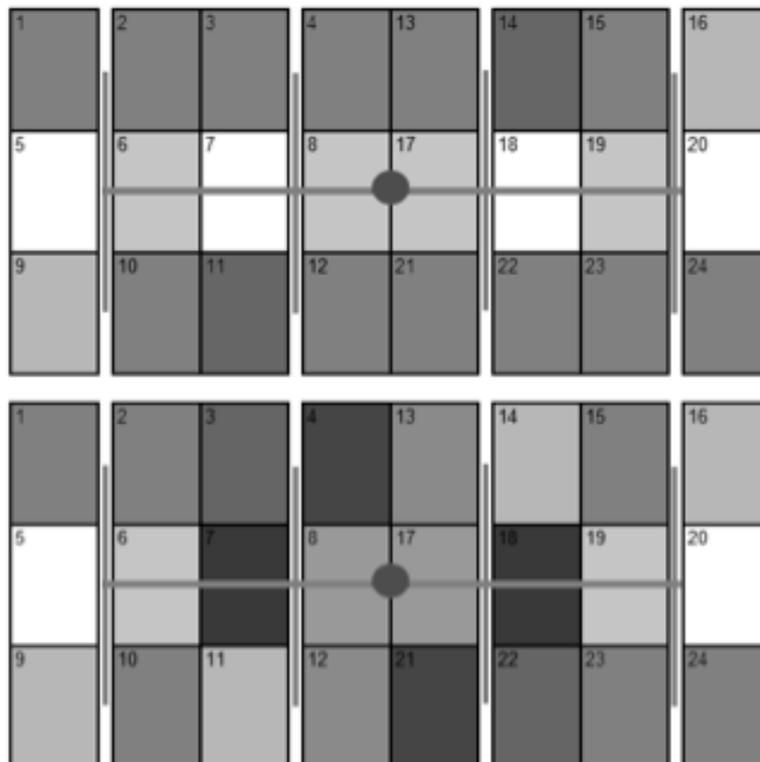


Figura 6. Turnos de riego en parcela de 15 ha. Panel superior: 4 subunidades por riego simultáneo en espárrago, vid y tomate. Panel inferior: 2 subunidades con páprika y cebolla.

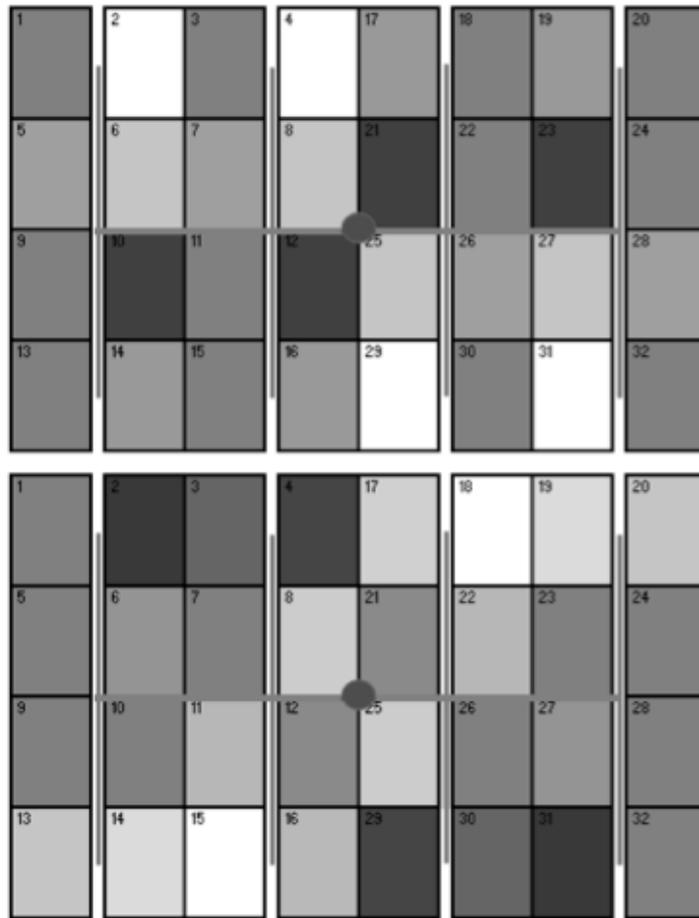


Figura 7. Turnos de riego en parcela de 20 ha. Panel superior: 4 subunidades con espárrago, vid y tomate. Panel inferior: 2 subunidades con páprika y cebolla.

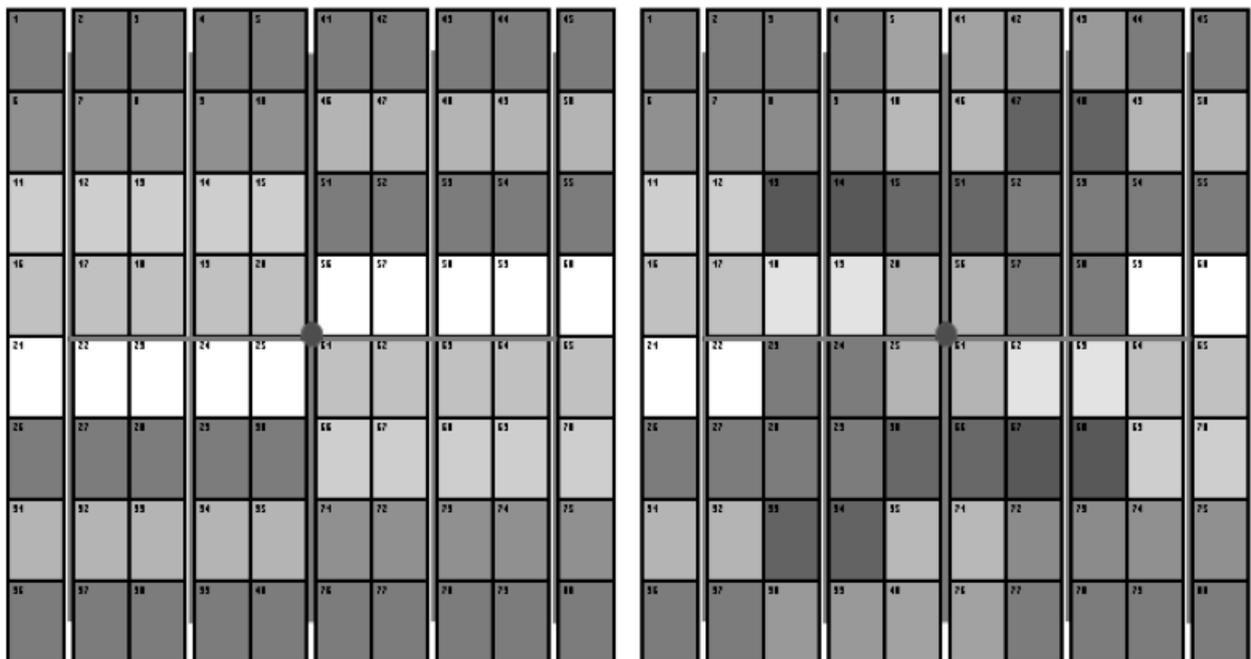


Figura 8. Turnos de riego en parcela de 50 ha. Panel superior: 10 subunidades con espárrago, vid y tomate. Panel inferior: 4 subunidades con páprika y cebolla.

Se diseñó el sistema de riego por aspersión para aplicar la lámina de lavado de sales; por lo que se compatibilizó el diseño del sistema de aspersión con el diseño del sistema de riego por goteo en las 25 combinaciones de parcelas del estudio. El aspersor elegido fue el Naam de presión 15 m y caudal 1,44 m³/h en líneas de mangueras de PEMD de 25 mm de diámetro con 50 m de longitud, conectados al manifold a nivel de subunidad de riego, a través de hidrantes de acople rápido con salidas de 3/4". La lámina de lavado de sales se obtuvo con la conductividad eléctrica al 75 % de producción de los cultivos, aplicando la ecuación propuesta por Coachelli (Bliesner y Keller, 2001). Con ayuda del regulador de presión Plastro GVAT en el arco de riego, el sistema está preparado para accionar aspersores de 15 m de presión nominal.

Datos de entrada para formular el modelo de Programación Lineal.

Los diámetros comerciales disponibles en el mercado son de 2", 3", 4", 6" y 8" con costos que se detallan en la Tabla 5.

El factor de recuperación del capital es igual a

$$FRC = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} = 0.1468 \quad \text{para un periodo de vida útil de 10 años (n) e interés bancario del 10 \% (r).}$$

El costo anual de bombeo del sistema es igual a:

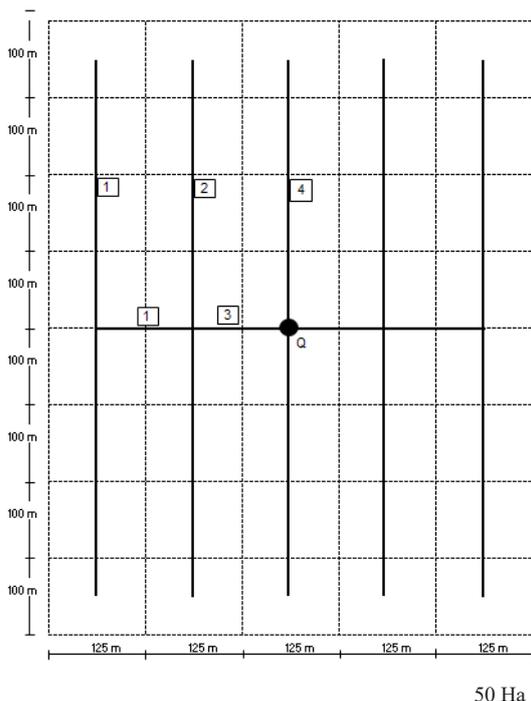
$$C = C_{energía} + C_{bomba} = \frac{C_{Villacuri}}{0.93hp-hr/kw-hr} \frac{Q * t}{76 * E} + C_{bomba}$$

Donde: C_{Villacuri} es el costo de energía en la zona de estudio, 0.0769 \$/kw-h (agosto 2004); C_{bomba} es el costo de la bomba C_b = 12233 + 95Ht (Hidrostral); Q es el caudal total del sistema (l/s) de la Tabla 2; t son las horas de bombeo anual; E es la eficiencia de la bomba*eficiencia del motor, 70 % y 90 % respectivamente (Hidrostral).

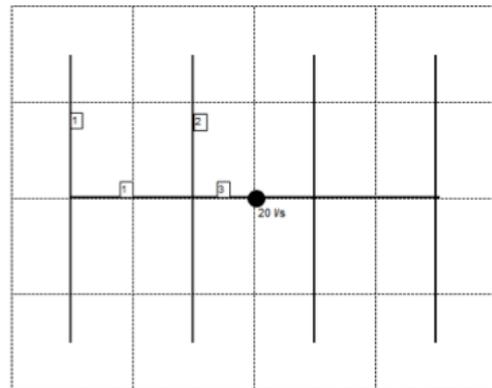
Se tuvo en cuenta la simetría de la red y turnos de riego en la selección de los tramos de tubería de la red de distribución. Así, se tuvo 4, 3, 3, 3 y 1 tramos en las parcelas de 50, 20, 15, 10 y 5 ha respectivamente, que se aprecia en la Fig. 9. Las pérdidas de carga en la red de distribución se detallan en la Tabla 6, por tramos de la red, según la simetría del sistema.

Tabla 5. Costo de tuberías anualizadas

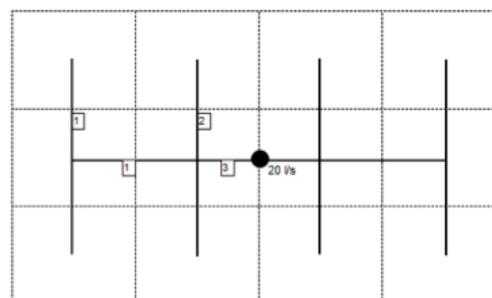
N°	Diámetro exterior		Espesor mm	Diámetro interior mm	C. Unitario \$/m	C. Anualiz \$/m
	Pulg.	mm				
1	2	60	1,8	58,2	1,38	0,18
2	3	89	2,2	84,1	2,08	0,27
3	4	114	2,8	106,4	3,41	0,45
4	6	168	4,1	159,8	7,35	0,97
5	8	219	5,3	208,4	12,38	1,63



50 Ha



20 Ha



15 Ha

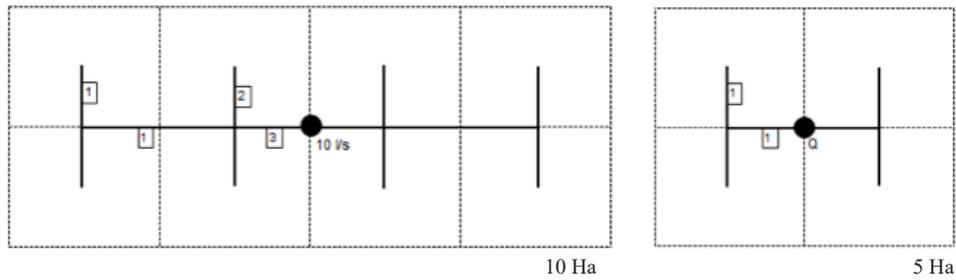


Figura 9. Tramos de tubería según simetría y turnos de riego en la red de distribución.

Modelos de programación lineal

Se formularon 25 modelos de programación lineal según tamaño de parcela y cultivos seleccionados; con variables de decisión en la presión de operación de la bomba (Ht)

y longitudes de los tramos de tubería (L_{ij}), donde i toma valores de 1, 2, 3 y 4 y j toma valores de 2”, 3”, 4”, 6” y 8” pulgadas, respectivamente.

Tabla 6. Pérdidas por fricción (m/m) en 50 ha(a), 20 y 15 ha(b), 10 ha(c) y 5 ha(d)

a) Diámetro (pulg)	Espárrago, Vid, Tomate: 50 ha con caudal de bombeo 50 l/s				Páprika, Cebolla: 50 ha con caudal de bombeo de 40 l/s			
	Tramo 1 10 l/s	Tramo 2 10 l/s	Tramo 3 20 l/s	Tramo 4 5 l/s	Tramo 1 20 l/s	Tramo 2 20 l/s	Tramo 3 20 l/s	Tramo 4 20 l/s
2	0,20393	0,20393	0,73620	0,05649	0,73620	0,73620	0,73620	0,73620
3	0,03396	0,03396	0,12258	0,00941	0,12258	0,12258	0,12258	0,12258
4	0,01080	0,01080	0,03899	0,00299	0,03899	0,03899	0,03899	0,03899
6	0,00149	0,00149	0,00538	0,00041	0,00538	0,00538	0,00538	0,00538
8	0,00041	0,00041	0,00148	0,00011	0,00148	0,00148	0,00148	0,00148
b) Diámetro (pulg)	Espárrago, Vid: 20, 15 ha, caudal de bombeo 20 l/s			Páprika, Cebolla: 20, 15 ha, caudal de bombeo 20 l/s				
	Tramo 1 5 l/s	Tramo 2 5 l/s	Tramo 3 10 l/s	Tramo 1 10 l/s	Tramo 2 10 l/s	Tramo 3 10 l/s		
2	0,05649	0,05649	0,20393	0,20393	0,20393	0,20393		
3	0,00941	0,00941	0,03396	0,03396	0,03396	0,03396		
4	0,00299	0,00299	0,01080	0,01080	0,01080	0,01080		
6	0,00041	0,00041	0,00149	0,00149	0,00149	0,00149		
8	0,00011	0,00011	0,00041	0,00041	0,00041	0,00041		
c) Diámetro (pulg)	Espárrago, Vid: 10 ha, caudal de bombeo 10 l/s			Páprika, Cebolla: 10 ha, caudal de bombeo 10 l/s				
	Tramo 1 5 l/s	Tramo 2 5 l/s	Tramo 3 10 l/s	Tramo 1 10 l/s	Tramo 2 10 l/s	Tramo 3 10 l/s		
2	0,05649	0,05649	0,20393	0,20393	0,20393	0,20393		
3	0,00941	0,00941	0,03396	0,03396	0,03396	0,03396		
4	0,00299	0,00299	0,01080	0,01080	0,01080	0,01080		
6	0,00041	0,00041	0,00149	0,00149	0,00149	0,00149		
8	0,00011	0,00011	0,00041	0,00041	0,00041	0,00041		
d) Diámetro (pulg)	Espárrago, Vid: 5 ha, caudal de bombeo 5 l/s	Páprika, Cebolla: 5 ha, caudal de bombeo 10 l/s						
	Tramo 1 5 l/s	Tramo 1 10 l/s						
2	0,05649	0,20393						
3	0,00941	0,03396						
4	0,00299	0,01080						
6	0,00041	0,00149						
8	0,00011	0,00041						

El modelo de programación lineal, en cebolla, con 50 ha es: $Z = 258,4Ht + 0,182L11 + 0,273L12 + 0,448L13 + 0,966L14 + 1,628L15 + 0,182L21 + 0,273L22 + 0,448L23 + 0,966L24 + 1,628L25 + 0,182L31 + 0,273L32 + 0,448L33 + 0,966L34 + 1,628L35 + 0,182L41 + 0,273L42 + 0,448L43 + 0,966L44 + 1,628L45$; $Ht - 0,7362L11 - 0,1226L12 - 0,0390L13 - 0,0054L14 - 0,0015L15 - 0,7362L31 - 0,1226L32 - 0,0390L33 - 0,0054L34 - 0,0015L35 \geq 12,63$; $Ht - 0,7362L21 - 0,1226L22 - 0,0390L23 - 0,0054L24 - 0,0015L25 - 0,7362L41 - 0,1226L42 - 0,0390L43 - 0,0054L44 - 0,0015L45 \geq 12,63$; $L11 + L12 + L13 + L14 + L15 = 475$; $L21 + L22 + L23 + L24 + L25 = 350$; $L31 + L32 + L33 + L34 + L35 = 125$; $L41 + L42 + L43 + L44 + L45 = 350$.

En el caso de cebolla con 20 ha es: $Z = 111,7Ht + 0,182L11 + 0,273L12 + 0,448L13 + 0,966L14 + 1,628L15 + 0,182L21 + 0,273L22 + 0,448L23 + 0,966L24 + 1,628L25 + 0,182L31 + 0,273L32 + 0,448L33 + 0,966L34 + 1,628L35$; $Ht - 0,2039L11 - 0,0340L12 - 0,0108L13 - 0,0015L14 - 0,0004L15 - 0,2039L31 - 0,0340L32 - 0,0108L33 - 0,0015L34 - 0,0004L35 \geq 12,63$; $Ht - 0,2039L21 - 0,0340L22 - 0,0108L23 - 0,0015L24 - 0,0004L25 - 0,2039L41 - 0,0340L42 - 0,0108L43 - 0,0015L44 - 0,0004L45 \geq 12,63$; $L11 + L12 + L13 + L14 + L15 = 275$; $L21 + L22 + L23 + L24 + L25 = 150$; $L31 + L32 + L33 + L34 + L35 = 62,5$.

Para la cebolla con 15 ha es: $Z = 72,8Ht + 0,182L11 + 0,273L12 + 0,448L13 + 0,966L14 + 1,628L15 + 0,182L21 + 0,273L22 + 0,448L23 + 0,966L24 + 1,628L25 + 0,182L31 + 0,273L32 + 0,448L33 + 0,966L34 + 1,628L35$; $Ht - 0,2039L11 - 0,0340L12 - 0,0108L13 - 0,0015L14 - 0,0004L15 - 0,2039L31 - 0,0340L32 - 0,0108L33 - 0,0015L34 - 0,0004L35 \geq 12,63$; $Ht - 0,2039L21 - 0,0340L22 - 0,0108L23 - 0,0015L24 - 0,0004L25 - 0,2039L41 - 0,0340L42 - 0,0108L43 - 0,0015L44 - 0,0004L45 \geq 12,63$; $L11 + L12 + L13 + L14 + L15 = 225$; $L21 + L22 + L23 + L24 + L25 = 100$; $L31 + L32 + L33 + L34 + L35 = 62,5$.

El modelo para cebolla con 10 ha es: $Z = 92,2Ht + 0,182L11 + 0,273L12 + 0,448L13 + 0,966L14 + 1,628L15 + 0,182L21 + 0,273L22 + 0,448L23 + 0,966L24 + 1,628L25 + 0,182L31 + 0,273L32 + 0,448L33 + 0,966L34 + 1,628L35$; $Ht - 0,2039L11 - 0,0340L12 - 0,0108L13 - 0,0015L14 - 0,0004L15 - 0,2039L31 - 0,0340L32 - 0,0108L33 - 0,0015L34 - 0,0004L35 \geq 12,63$; $Ht - 0,2039L21 - 0,0340L22 - 0,0108L23 - 0,0015L24 - 0,0004L25 - 0,2039L41 - 0,0340L42 - 0,0108L43 - 0,0015L44 - 0,0004L45 \geq 12,63$; $L11 + L12 + L13 + L14 + L15 = 175$; $L21 + L22 + L23 + L24 + L25 = 50$; $L31 + L32 + L33 + L34 + L35 = 62,5$.

En las Figuras 10, 11, 12 y 13 se detalla para el resto de cultivos en 50, 20, 15 y 10 ha, respectivamente.

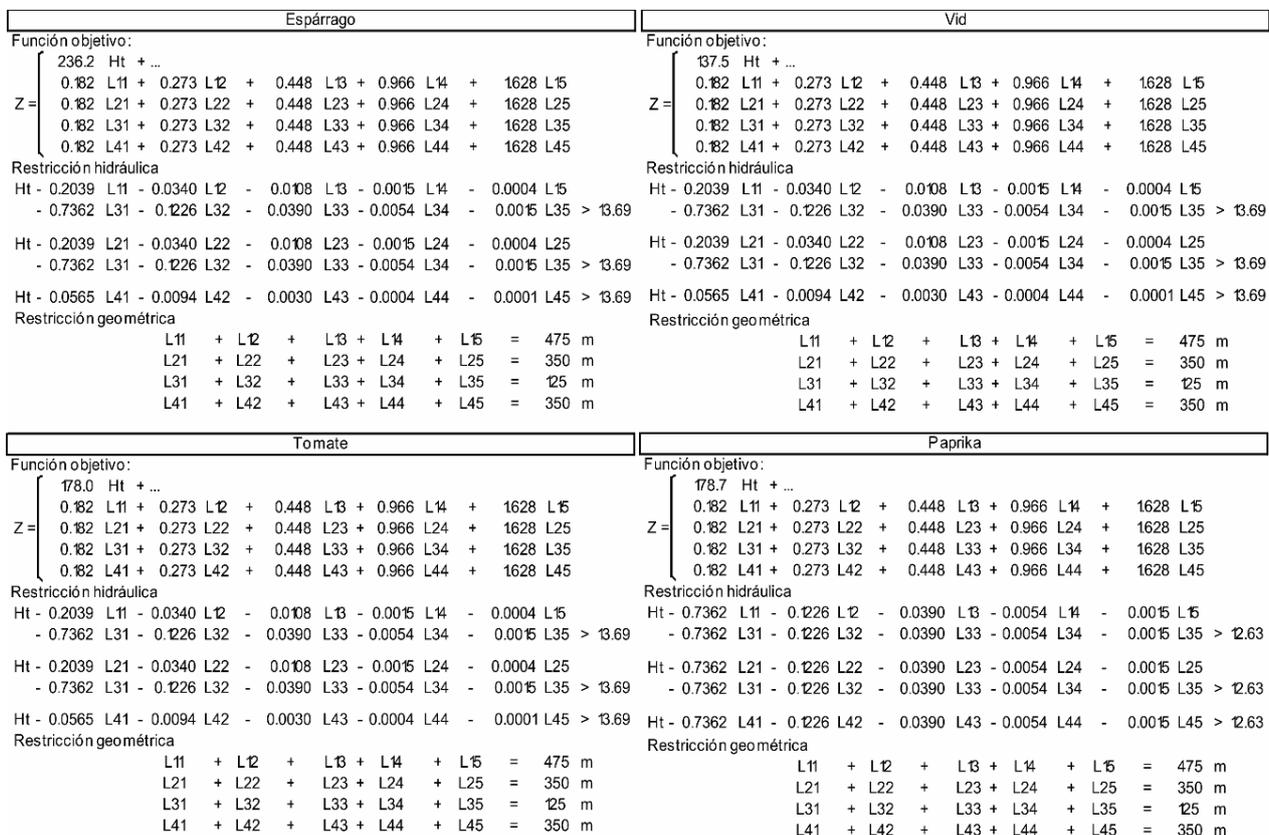


Figura 10. Modelos de programación lineal en parcelas de 50 ha, según cultivo.

Espárrago						Vid					
Función objetivo: $Z = \begin{bmatrix} 102.8 \text{ Ht} + \dots \\ 0.182 \text{ L11} + 0.273 \text{ L12} + 0.448 \text{ L13} + 0.966 \text{ L14} + 1628 \text{ L15} \\ 0.182 \text{ L21} + 0.273 \text{ L22} + 0.448 \text{ L23} + 0.966 \text{ L24} + 1628 \text{ L25} \\ 0.182 \text{ L31} + 0.273 \text{ L32} + 0.448 \text{ L33} + 0.966 \text{ L34} + 1628 \text{ L35} \end{bmatrix}$						Función objetivo: $Z = \begin{bmatrix} 63.4 \text{ Ht} + \dots \\ 0.182 \text{ L11} + 0.273 \text{ L12} + 0.448 \text{ L13} + 0.966 \text{ L14} + 1628 \text{ L15} \\ 0.182 \text{ L21} + 0.273 \text{ L22} + 0.448 \text{ L23} + 0.966 \text{ L24} + 1628 \text{ L25} \\ 0.182 \text{ L31} + 0.273 \text{ L32} + 0.448 \text{ L33} + 0.966 \text{ L34} + 1628 \text{ L35} \end{bmatrix}$					
Restricción hidráulica: $1 \text{ Ht} - 0.0565 \text{ L11} - 0.0094 \text{ L12} - 0.0030 \text{ L13} - 0.0004 \text{ L14} - 0.0001 \text{ L15} - 0.2039 \text{ L31} - 0.0340 \text{ L32} - 0.0108 \text{ L33} - 0.0015 \text{ L34} - 0.0004 \text{ L35} > 13.69$ $1 \text{ Ht} - 0.0565 \text{ L21} - 0.0094 \text{ L22} - 0.0030 \text{ L23} - 0.0004 \text{ L24} - 0.0001 \text{ L25} - 0.2039 \text{ L31} - 0.0340 \text{ L32} - 0.0108 \text{ L33} - 0.0015 \text{ L34} - 0.0004 \text{ L35} > 13.69$						Restricción hidráulica: $1 \text{ Ht} - 0.0565 \text{ L11} - 0.0094 \text{ L12} - 0.0030 \text{ L13} - 0.0004 \text{ L14} - 0.0001 \text{ L15} - 0.2039 \text{ L31} - 0.0340 \text{ L32} - 0.0108 \text{ L33} - 0.0015 \text{ L34} - 0.0004 \text{ L35} > 13.69$ $1 \text{ Ht} - 0.0565 \text{ L21} - 0.0094 \text{ L22} - 0.0030 \text{ L23} - 0.0004 \text{ L24} - 0.0001 \text{ L25} - 0.2039 \text{ L31} - 0.0340 \text{ L32} - 0.0108 \text{ L33} - 0.0015 \text{ L34} - 0.0004 \text{ L35} > 13.69$					
Restricción geométrica: $\text{L11} + \text{L12} + \text{L13} + \text{L14} + \text{L15} = 175 \text{ m}$ $\text{L21} + \text{L22} + \text{L23} + \text{L24} + \text{L25} = 50 \text{ m}$ $\text{L31} + \text{L32} + \text{L33} + \text{L34} + \text{L35} = 62.5 \text{ m}$						Restricción geométrica: $\text{L11} + \text{L12} + \text{L13} + \text{L14} + \text{L15} = 175 \text{ m}$ $\text{L21} + \text{L22} + \text{L23} + \text{L24} + \text{L25} = 50 \text{ m}$ $\text{L31} + \text{L32} + \text{L33} + \text{L34} + \text{L35} = 62.5 \text{ m}$					
Tomate						Páprika					
Función objetivo: $Z = \begin{bmatrix} 79.6 \text{ Ht} + \dots \\ 0.182 \text{ L11} + 0.273 \text{ L12} + 0.448 \text{ L13} + 0.966 \text{ L14} + 1628 \text{ L15} \\ 0.182 \text{ L21} + 0.273 \text{ L22} + 0.448 \text{ L23} + 0.966 \text{ L24} + 1628 \text{ L25} \\ 0.182 \text{ L31} + 0.273 \text{ L32} + 0.448 \text{ L33} + 0.966 \text{ L34} + 1628 \text{ L35} \end{bmatrix}$						Función objetivo: $Z = \begin{bmatrix} 66.7 \text{ Ht} + \dots \\ 0.182 \text{ L11} + 0.273 \text{ L12} + 0.448 \text{ L13} + 0.966 \text{ L14} + 1628 \text{ L15} \\ 0.182 \text{ L21} + 0.273 \text{ L22} + 0.448 \text{ L23} + 0.966 \text{ L24} + 1628 \text{ L25} \\ 0.182 \text{ L31} + 0.273 \text{ L32} + 0.448 \text{ L33} + 0.966 \text{ L34} + 1628 \text{ L35} \end{bmatrix}$					
Restricción hidráulica: $1 \text{ Ht} - 0.0565 \text{ L11} - 0.0094 \text{ L12} - 0.0030 \text{ L13} - 0.0004 \text{ L14} - 0.0001 \text{ L15} - 0.2039 \text{ L31} - 0.0340 \text{ L32} - 0.0108 \text{ L33} - 0.0015 \text{ L34} - 0.0004 \text{ L35} > 13.69$ $1 \text{ Ht} - 0.0565 \text{ L21} - 0.0094 \text{ L22} - 0.0030 \text{ L23} - 0.0004 \text{ L24} - 0.0001 \text{ L25} - 0.2039 \text{ L31} - 0.0340 \text{ L32} - 0.0108 \text{ L33} - 0.0015 \text{ L34} - 0.0004 \text{ L35} > 13.69$						Restricción hidráulica: $1 \text{ Ht} - 0.2039 \text{ L11} - 0.0340 \text{ L12} - 0.0108 \text{ L13} - 0.0015 \text{ L14} - 0.0004 \text{ L15} - 0.2039 \text{ L31} - 0.0340 \text{ L32} - 0.0108 \text{ L33} - 0.0015 \text{ L34} - 0.0004 \text{ L35} > 12.63$ $1 \text{ Ht} - 0.2039 \text{ L21} - 0.0340 \text{ L22} - 0.0108 \text{ L23} - 0.0015 \text{ L24} - 0.0004 \text{ L25} - 0.2039 \text{ L31} - 0.0340 \text{ L32} - 0.0108 \text{ L33} - 0.0015 \text{ L34} - 0.0004 \text{ L35} > 12.63$					
Restricción geométrica: $\text{L11} + \text{L12} + \text{L13} + \text{L14} + \text{L15} = 175 \text{ m}$ $\text{L21} + \text{L22} + \text{L23} + \text{L24} + \text{L25} = 50 \text{ m}$ $\text{L31} + \text{L32} + \text{L33} + \text{L34} + \text{L35} = 62.5 \text{ m}$						Restricción geométrica: $\text{L11} + \text{L12} + \text{L13} + \text{L14} + \text{L15} = 175 \text{ m}$ $\text{L21} + \text{L22} + \text{L23} + \text{L24} + \text{L25} = 50 \text{ m}$ $\text{L31} + \text{L32} + \text{L33} + \text{L34} + \text{L35} = 62.5 \text{ m}$					

Figura 12. Modelos de programación lineal en parcelas de 10 ha, según cultivo.

Tabla 7. Solución a modelos de programación lineal: diámetros y longitudes de tubería

Espárrago						Vid					
	50	20	15	10	5		50	20	15	10	5
Ht	14,74	14,62	14,47	14,71	14,03	Ht	16,98	14,62	15,31	14,40	14,75
Tramo1	475m 6"	275m de 4"	225m de 4"	175m de 4"	112,5m de 4"	Tramo1	205m de 4"	275m de 4"	40m de 3"	175m de 4"	112,5m de 3"
Tramo2	20m de 4"	60m de 3"	60m de 3"	50m de 3"		270m de 6"	185m de 4"				
Tramo3	330m 6"	90m de 4"	40m de 4"		62,5m de 4"	Tramo2	225m de 4"	60m de 3"	100 de 3"	50m de 3"	
	40m de 6"	62,5m de 6"	62,5m de 6"	Tramo3		125m de 6"	90m de 4"	62,5m de 4"	62,5m de 4"		
85m de 8"	Tramo4			350m de 3"							
Tramo4	350m 4"										
Tomate						Ají Páprika					
	50	20	15	10	5		50	20	15	10	5
Ht	15,07	14,62	14,46	14,40	14,03	Ht	15,86	14,34	15,78	15,20	13,85
Tramo1	475m 6"	275m de 4"	225m de 4"	175m de 4"	112,5m de 4"	Tramo1	475m de 6"	130m de 4"	225m de 4"	175m de 4"	112,5m de 4"
Tramo2	20m de 4"	60m de 3"	60m de 3"	50m de 3"	112,5m de 4"	Tramo2	20m de 4"	150m de 4"	60m de 3"	50m de 3"	
	330m 6"	90m de 4"	40m de 4"				330m de 6"		40m 4"		
Tramo3	125m 6"	62,5m de 6"	62,5m de 6"	62,5m de 4"	Tramo3	125m de 6"	62,5m de 6"	62,5m de 4"	62,5m de 4"		
Tramo4	50m de 3"				112,5m de 4"	Tramo4	40m de 4"				
	300m 4"						310m de 6"				
Cebolla						Ht: altura de bombeo óptima					
	50	20	15	10	5						
Ht	14,70	13,13	13,80	15,20	13,85						
Tramo1	300m 6"	275m de 6"	80m de 4"	175m de 4"	112,5m de 4"						
	175m 8"		145m de 6"								
Tramo2	350m 6"	20m de 4"	100 de 4"	50m de 3"							
		130m de 6"									
Tramo3	125m 8"	62,5m de 6"	62,5m de 6"	62,5m de 4"							
Tramo4	10m 4"										
	340m 6"										

El sistema de bombeo está compuesto de una bomba sumergible con motor diesel que extrae agua del subsuelo y alimenta directamente el sistema de riego por medio del cabezal de riego, que se diseñó en función del caudal y presión de operación del sistema.

La presión requerida a la salida de la estación de bombeo (H) es: $H = H_{t_{\text{optima}}} + H_{\text{succión del pozo}} + \text{pérdida en el cabezal y conexiones de subunidad de riego}$; $H = H_{t_{\text{optima}}} + 25\text{m} + 10\text{m}$. Donde: $H_{\text{succión}}$ para explotación del agua subterránea es de 25 m (Baldeón, 2003).

Evaluación económica

Se realizó para un horizonte del proyecto de 10 años, con una tasa de interés efectiva de la banca comercial del 17 % (i), evaluándose indicadores de rentabilidad como VANE, TIRE y B/C que se muestran en la Tabla 8.

Los costos de operación y mantenimiento se detallan en la Tabla 9 y los costos de cultivo en la Tabla 10. Detalles del metrado y costos del equipo de riego se muestran en la Tabla 11.

En la **Fig. 15** se visualiza la rentabilidad del proyecto para una tasa interna de retorno económica (TIRE) del 17 % y se observa las parcelas que no son rentables al tener un TIRE menor al 17 %. Las parcelas de espárrago son

rentables con tamaño de parcelas iguales o mayores a 20 ha, con un TIRE de 18,1 %, VANE de 9 mil dólares y una relación de B/C de 1.1. En el caso de la vid son rentables con tamaño de parcela de 50 ha, con un TIRE de 17,4 %, VANE de 12 mil dólares y una relación B/C de 1,0.

En el caso del tomate, cebolla y ají páprika, son rentables con todos los tamaños de parcela; siendo los indicadores de rentabilidad para 5 ha de tomate: 29 %, 25 mil dólares y 1,4 de TIRE, VANE y B/C, respectivamente. Para 5 ha de cebolla los indicadores son: 33 %, 38 mil dólares y 1,5 de TIRE, VANE y B/C, respectivamente. En el caso de 5 ha de páprika, los indicadores son 24 %, 15 mil dólares y 1,2 de TIRE, VANE y B/C, respectivamente.

4. Conclusiones

Los resultados de los 25 modelos de programación lineal y evaluación económica indican que los tamaños de parcela mínimos óptimos para el proyecto son de 20 ha para espárrago, 50 ha para vid y 5 ha para tomate, cebolla y ají páprika.

De los cinco cultivos propuestos, es la cebolla la que presenta la mayor rentabilidad seguida, en orden decreciente, del tomate, aj páprika, espárrago y vid. Son

Tabla 8. Indicadores de rentabilidad: VANE, TIRE y B/C

Ha	Espárrago			Vid			Tomate			Cebolla			Páprika		
	VANE*	B/C	TIRE	VANE*	B/C	TIRE	VANE*	B/C	TIRE	VANE*	B/C	TIRE	VANE*	B/C	TIRE
5	-19	0,7	10,3	-23	0,6	10,5	25	1,4	29,0	38	1,5	33,1	15	1,2	23,8
10	-8	09	15,2	-17	0,8	14,2	79	1,8	41,9	110	2,1	49,9	66	1,7	36,7
15	-6	10	16,2	-15	0,9	15,3	126	1,9	449	171	2,2	51,5	106	1,8	39,2
20	9	11	181	-8	1,0	16,3	185	2,1	51,1	235	2,2	53,8	154	1,9	432
50	39	1,1	18,9	12	1,0	17,4	482	2,2	54,7	629	2,5	60,7	410	2,0	46,8

* en miles de dólares.

Tabla 9. Costos de la operación y mantenimiento del sistema de riego

Cultivo	Costo anual de energía (\$)					Costo (oper+manten)				
	50 ha	20 ha	15 ha	10 ha	5 ha	50 ha	20 ha	15 ha	10 ha	5 ha
Espárrago	11557	4623	3467	2311	1156	17336	6934	5201	3467	1734
Vid	6424	2569	1927	1285	642	9636	3854	2891	1927	964
Tomate	8532	3413	2560	1706	853	12798	5119	3839	2560	1280
Aj Páprika	6855	2742	2056	1371	685	10282	4113	3085	2056	1028
Cebolla	10170	4068	3051	2034	1017	15255	6102	4577	3051	1526

Tabla 10. Costos de producción, rendimiento y precio de los cultivos

Detalle (año 2009)	Espárrago UC 157 F1		Vid Quebranta		Tomate	Cebolla	Aji
	instalación	mantenimiento	instalación	mantenimiento	RoGrande	Amarilla	Páprika
Costo de producción \$/ha	5000	4000	10000	2500	4000	3000	3000
Rendimiento kg/ha	3000	10000	8000	18000	70000	4200	5000
Precio \$/kg	0,75	0,75	0,39	0,39	0,11	0,18	1,30

Tabla 11. Metrado y costos del equipo de riego en parcelas según cultivo

Detalle	Unidad	C.U. Espárrago	50 ha (80 subunidades de riego)					20 ha (32 subunidades)			15 ha (24 subunidades)			
			Vid	Tomate	Páprika	Cebolla	Esparra, Vid, Tomate	Páprika	Cebolla	Espárrago Tomate	Vid	Páprika	Cebolla	
Subunidad de Riego			209137	209137	209137	220253	220253	83855	88493	88493	63620	63620	66859	66859
<u>En manguera de Goteo:</u>														
PEBD ø=16mm con 3 got/mt	m	0,65	156000	156000	156000	156000	156000	62400	62400	62400	46800	46800	46800	46800
Anillo conector rápido de PE	unid.	0,40	1920	1920	1920	1920	1920	768	768	768	576	576	576	576
Tapón final PE ø=16mm	unid.	0,10	480	480	480	480	480	192	192	192	144	144	144	144
<u>En el manifold:</u>														
Tubería PVC ø=2"	m	1,38	6624	6624	6624	0	0	2650	0	0	1987	1987	0	0
Tubería PVC ø=3"	m	2,08	0	0	0	9984	9984	0	3994	3994	0	0	2995	2995
Tapón final PVC	unid.	0,40	32	32	32	32	32	13	13	13	10	10	10	10
Montura 2"-3/4", L=1.1m	unid.	8,00	6400	6400	6400	0	0	2560	0	0	1920	1920	0	0
Montura 3"-3/4", L=1.1m	unid.	12,00	0	0	0	9600	9600	0	3840	3840	0	0	2880	2880
Válvula de acople rápido de 3/4"	unid.	15,00	12000	12000	12000	12000	12000	4800	4800	4800	3600	3600	3600	3600
Conector PEAD con 6 salidas	unid.	1,55	1240	1240	1240	1240	1240	496	496	496	372	372	372	372
<u>En el arco:</u>														
Tubería PVC negro ø=2"	m	2,00	480	480	480	0	0	192	0	0	144	144	0	0
Tubería PVC negro ø=3"	m	3,20	0	0	0	768	768	0	307	307	0	0	230	230
Codo 90° de PVC 2"	unid.	2,45	392	392	392	0	0	157	0	0	118	118	0	0
Codo 90° de PVC 3"	m	4,90	0	0	0	784	784	0	314	314	0	0	235	235
Niple 2", L=1.10m	unid.	2,70	216	216	216	0	0	86	0	0	65	65	0	0
Niple 3", L=1.10m	unid.	4,10	0	0	0	328	328	0	131	131	0	0	98	98
Válvula acople rápido de 3/4"	unid.	15,00	2400	2400	2400	2400	2400	960	960	960	720	720	720	720
Regulador de presión de 2"	unid.	150	12000	12000	12000	0	0	4800	0	0	3600	3600	0	0
Regulador de presión de 3"	unid.	220	0	0	0	17600	17600	0	7040	7040	0	0	5280	5280
Válvula de paso de 2"	unid.	27,00	2160	2160	2160	0	0	864	0	0	648	648	0	0
Válvula de paso de 3"	unid.	40,00	0	0	0	3200	3200	0	1280	1280	0	0	960	960
Inyector fertilizante tipo venturi	unid.	1000	2000	2000	2000	2000	2000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
<u>Arco, solo para lavado de sales:</u>														
Aspersor Q=1.44m ³ /h (12x12)	m	10,68	1068	1068	1068	427	427	427	214	214	427	427	214	214
Elevador h=1.0m	unid.	0,95	95	95	95	38	38	38	19	19	38	38	19	19
Manguera PEMD, ø=25mm	unid.	0,72	3600	3600	3600	1440	1440	1440	720	720	1440	1440	720	720
Tapón 25mm	unid.	0,30	30	30	30	12	12	12	6	6	12	12	6	6
Línea de Distribución			45464	29462	40605	48481	53309	7571	10989	19131	7737	4462	7737	9182
Tubería PVC 3"	m	2,08	0	1456	416	0	0	374	0	0	499	1165	499	0
Tubería PVC 4"	m	3,41	2660	5865	2319	546	68	4126	3819	273	4126	2097	4126	2455
Tubería PVC 6"	m	7,35	22418	11613	21830	28224	24108	919	3418	10988	919	0	919	3344
Tubería PVC 8"	m	12,38	2105	0	0	0	6438							
Unión doble campana 3"	unid.	3,50	0	490	140	0	0	126	0	0	168	392	168	0
Unión doble campana 4"	unid.	5,00	780	1720	680	160	20	1210	1120	80	1210	615	1210	720
Unión doble campana 6"	unid.	25,00	15250	7900	14850	19200	16400	625	2325	7475	625	0	625	2275
Unión doble campana 8"	unid.	52,00	1768	0	0	0	5408							

Reducción PVC 8"-6"	unid.	44,50	89	0	0	0	356							
Reducción PVC 8"-4"	unid.	40,50	81	0	0	0	0							
Reducción PVC 6"-4"	unid.	18,30	73	146	110	110	37							
Reducción PVC 6"-3"	unid.	15,20	0	30	0	0	0							
Reducción PVC 4"-3"	unid.	9,72	0	0	19	0	0	39	0	0	39	78	39	0
Reducción PVC 6"-4"								37	146	73	37	0	37	146
Tee 4"								115	0	0	115	115	115	0
Tee 6"	unid.	40,23	241	241	241	241	0	0	161	241	0	0	0	241
Tee 8"	unid	79,15	0	0	0	0	475							
Unidad de Bombeo			29264	29264	29264	25514	25514	13657	13657	13657	13657	13657	13657	13657
Hidroclon 4"	unid.	400	2000	2000	2000	1600	1600	800	800	800	800	800	800	800
Filtro de malla 4"	unid.	500	2500	2500	2500	2000	2000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Tubería de aire de 2"	unid.	100	500	500	500	400	400	200	200	200	200	200	200	200
Válvula volumétrica 8"	unid.	3900	3900	3900	3900	3900	3900							
Válvula volumétrica 6"								2800	2800	2800	2800	2800	2800	2800
Manómetro	unid.	28,50	114	114	114	114	114	57	57	57	57	57	57	57
Control para manómetro	unid.	6,82	68	68	68	55	55	27	27	27	27	27	27	27
Válvula de control 4"	unid.	68,20	682	682	682	546	546	273	273	273	273	273	273	273
Tubería y accesorios de F ³ G ³	unid.	1000	1000	1000	1000	900	900	500	500	500	500	500	500	500
Bomba sumerg 10HP + motor														
Bomba sumerg 20HP + motor								8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000
Bomba sumerg 50HP + motor	unid.	18500	18500	18500	18500	0	0							
Bomba sumerg 40HP + motor	unid.	16000	0	0	0	16000	16000							
Equipo de Riego			283866	267864	279006	294248	299077	105082	113139	121281	85015	81739	88254	89699
Instalación del Equipo de Riego (5%)			14193	13393	13950	14712	14954	5254	5657	6064	4251	4087	4413	4485
Perforación y desarrollo del pozo (prof=25m)			25000	25000	25000	25000	25000	25000	25000	25000	25000	25000	25000	25000
COSTO TOTAL año 2009 U.S \$			323059	306257	317956	333961	339030	135337	143796	152345	114266	110826	117667	119184

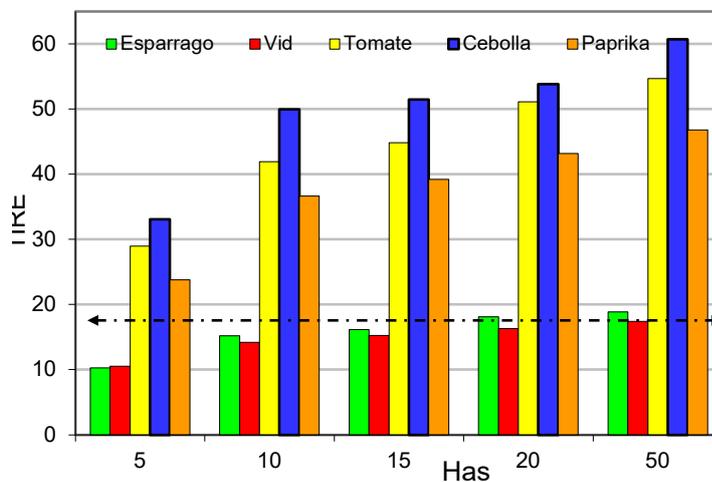


Figura 15. Tasa interna de retorno económico (TIRE) según tamaño de parcela y cultivo.

los cultivos transitorios (tomate, cebolla y páprika) los que, en general, presentan mayor rentabilidad que los cultivos permanentes (espárrago y vid).

Acorde con el análisis de sensibilidad, para una reducción de un 20 % en el rendimiento, se obtiene que la cebolla sigue siendo rentable en todos los tamaños de parcela; en cambio para el tomate y ají páprika solo resultó rentable en tamaños de parcela de 10, 15, 20 y 50 ha. En el caso de los cultivos permanentes (espárrago y vid), ninguno resultó rentable.

5. Literatura citada

Ascencios,TD. 1999. Diseño de la red de tuberías y costo de operación en los sistemas de riego a presión. *Revista Anales Científicos*. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, pp. 110-134.

Baldeón, QW. 2003. Metodología de autocalibración para el modelo de simulación del acuifero de Villacur. En *Maestría de Recursos Hídricos - Escuela de Postgrado*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina.

Bliesner, R.; Keller, J. 2001. Sprinkle and Trickle Irrigation. *The Blackburn Press*, p. 652.

Georgiadis, MC.; Schilling, G.; Rotstein, GE. y Macchietto.S.1999. A general mathematical programming approach for process plant layout. *Computers & Chemical Engineering*, 23: 823-840.

González-Cebollada, C.; Macarulla, B. 2012. Comparative analysis of design methods of pressurized irrigation networks. *Irrigation and Drainage*, 61: 1-9 doi: 10.1002/ird.657.

Swamee, PK.; Sharma, AK. 2013. Optimal design of a sewer line using Linear Programming. *Applied Mathematical Modelling*, 37: 4430-4439.