



**HIDRÁULICA Y COMPONENTES DE UN NUEVO SISTEMA DE RIEGO
PARCELARIO A BAJA PRESIÓN**

**Mario Alberto Montiel Gutiérrez^{1*}; Luis Fernando Velázquez Serrano²; Eduardo
Murillo Cardozo³**

¹Coordinación de Riego y Drenaje. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. México. mmontiel@tlaloc.imta.mx.
(*Autor para correspondencia)

²Presidente del Consejo de Administración de la AUPA Módulo IV-1 "Culiacancito" A.C. Distrito de Riego 010 Culiacán-Humaya, Sinaloa. Carretera Culiacán-Vitaruto Km 8 Estación Rosales, Culiacán, Sinaloa.

³Consultor de la AUPA Módulo IV-1 "Culiacancito" A.C. Distrito de Riego 010 Culiacán-Humaya, Sinaloa. Carretera Culiacán-Vitaruto Km 8 Estación Rosales, Culiacán, Sinaloa.

Resumen

Se aplica el método de cálculo paso a paso (SBS por sus siglas en inglés), para resolver numéricamente, la hidráulica de un lateral con y sin pendiente, asumiendo la ecuación del emisor para el cálculo de los gastos que transitan por cada tramo de la tubería de conducción con salidas múltiples (TCSM). La solución del último emisor, permite obtener de manera iterativa, el cálculo de los siguientes emisores hasta completar la tirada de riego. La solución para la ecuación general del gradiente de la línea de energía, se realiza mediante una ecuación general que considera utilizar cualquier fórmula de resistencia al flujo. El algoritmo se aplica en la propuesta de un nuevo sistema de riego a baja presión denominado "Velázquez ®", en donde sus componentes básicos son: el emisor, el cual es una tubería de polietileno para cada surco conectada al distribuidor, mismo que consiste en una tubería enterrada en la cabecera del sistema y aporta el gasto y la presión necesaria para el riego por gravedad. El gasto de diseño por surcos se obtiene con las condiciones topográficas y agronómicas de la parcela por lo que el diseño es integral e incrementa la eficiencia actual de los terrenos en un mínimo de un 20%. Se presentan ejemplos de caso en cuadros y gráficos que resumen los resultados, así como una breve discusión de los mismos.

Palabras clave adicionales: Sistema de riego a baja presión, hidráulica de tuberías con salidas múltiples.



Introducción

México cuenta con 6.5 millones de hectáreas de riego, de las cuales, se estima que en 90% de la superficie regada, principalmente en los distritos de riego, se utiliza el método de riego por gravedad y de acuerdo con trabajos de evaluaciones realizadas por diferentes instituciones, este método de riego no es muy eficiente debido a pérdidas de agua por percolación profunda y escurrimiento superficial. La eficiencia de aplicación promedio es de 50%.

El Gobierno Federal, está implementando el Proyecto de Riego por Gravedad Tecnificado (RIGRAT), teniendo como uno de los principales objetivos el hacer un uso más racional del agua de riego en las parcelas e incrementar la eficiencia a nivel parcelario y generar una cultura de ahorro del agua. Dentro de estas alternativas para el mejoramiento de la eficiencia parcelaria, está el entubamiento con sistemas de riego a baja presión y el diseño de sistemas de riego por gravedad con trazos de riego y nivelación de tierras. CONAGUA (2015).

Descripción del sistema de riego propuesto

Los sistemas de riego a baja presión (LPS por sus siglas en inglés) de reciente y novedosa introducción en la agricultura de riego por goteo, son de gran aceptación en México, por su bajo costo energético y su adaptabilidad a cultivos que tradicionalmente se riegan en surcos a gravedad. Presentan una propuesta de un sistema integral con salidas múltiples, con cargas hidráulicas de operación menores a 3 m y distribuidores de PVC o materiales flexibles con diámetros de 160 a 300 mm (o mayores) que minimizan las pérdidas de carga y permiten aprovechar la carga disponible en la fuente de abastecimiento que puede ser el mismo canal del riego. Sin embargo, debido a diferentes problemas de operación en el filtrado, su uso se ha limitado y la tendencia a tecnificar el riego parcelario, ha sido el mejoramiento del riego por gravedad con sistemas de riego entubados y tubería por multicompuertas portátiles, donde el emisor es una tubería de conducción con salidas múltiples, horadada a cada 80-90 cm, (similar al espaciamiento entre surcos), con gastos totales de 30 a 80 l/s y cargas hidráulicas de operación en el hidrante de 0.6 a 3 m, operando con la carga hidráulica del canal o bien con bombeo, tal y como se muestra en la siguiente figura 1:

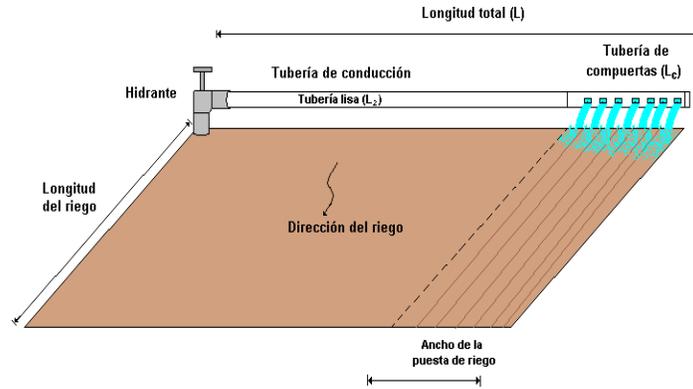


Figura 1. Descripción de los elementos de un sistema de riego de baja presión con tubería de compuertas.

La siguiente figura 2 muestra una nueva propuesta de un sistema de riego a baja presión conocido por "VELAZQUEZ[®]" en honor al agricultor que diseñó y estableció los primeros lotes en campo y está compuesta por los mismos hidrantes de riego del sistema de multicompuertas y entubamientos de regaderas parcelarias con salidas múltiples para el riego parcelario por surcos, con la diferencia, de que ahora el emisor es una tubería de polietileno para cada surco conectada a la tubería enterrada en la cabecera del sistema y la cual aporta el gasto y la presión necesaria para el riego.

La tubería enterrada en la cabecera de la parcela es una tubería de PVC o polietileno, en diámetros variables que pueden estar o no telescopiados desde 12" (315 mm), 10" (250 mm), 8" (192 mm), 6" (154 mm) y 4" (96 mm), para gastos de operación de 30 hasta 80 l/s, de acuerdo con el gasto que utiliza el productor.

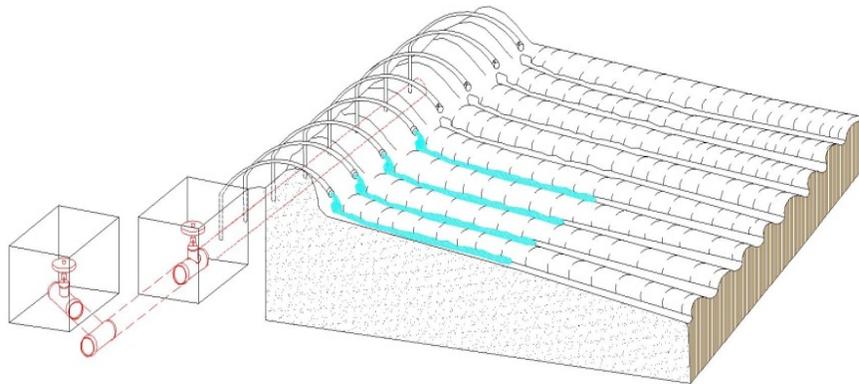


Figura 2. Sistema de riego a baja presión para riego por gravedad "VELAZQUEZ"[®]

A diferencia de los sistemas de riego tradicionales de tuberías por compuertas portátiles, éste sistema es permanente, fijo y adaptable al sistema de riego por gravedad tradicional tecnificado (RIGRAT) y/o al propio riego por goteo LPS. El costo de inversión e instalación es similar al de la tubería por compuertas con la diferencia que el productor ya no recoge y cambia los frentes de riego, situación



que en la práctica provocaba jornales adicionales y posibles robos de materiales en campo. En el Módulo de Riego “Culiacancito”, se han instalado más de 1,000 ha en el presente año 2015.

Otra de las ventajas de éste sistema con respecto al sistema tradicional de multicompuertas portátil, es la que el sistema es fijo y permite definir para cada caso en particular con base al diseño hidráulico por parcela, el diámetro de las tuberías de conducción con salidas múltiples (TCSM) telescopiadas desde el hidrante hasta el extremo de la parcela, lo que disminuye el costo del sistema. Se elimina la necesidad de compartir el equipo de riego en sistemas colectivos, lo que provocaba problemas sociales entre usuarios vecinos. Una ventaja adicional, es que el diámetro de manguera por surco, es diseñado para dar el gasto óptimo que requiere el surco para dar con base a un diseño por gravedad, al menos con un mínimo de un 70% de eficiencia de aplicación, situación que junto con el 100% de eficiencia de conducción interparcelaria, lo sitúa al nivel de un sistema de riego por aspersión portátil con costos mucho menores.

Diseño agronómico del sistema de riego por gravedad: gasto óptimo por surco

La primera parte del diseño del sistema de riego “Culiacancito®”, es la obtención del gasto óptimo por surco que permite una mejor uniformidad del riego por gravedad. El principal objetivo del riego por gravedad parcelario es aplicar la lámina de requerimiento de riego de manera uniforme. El diseño del riego por gravedad parcelario consiste en definir la dirección de riego de acuerdo con la pendiente longitudinal del terreno y el tipo de suelo, la longitud de riego, el ancho de la melga o el espaciamiento entre surcos y el gasto de riego por surco.

El software RIGRAV, calcula mediante la simulación del riego parcelario en terrenos nivelados, las fases de avance, consumo, almacenamiento y recesión, el gasto óptimo por surco que uniformiza el riego a lo largo del surco. El gasto óptimo por surco se diseña a partir de la lámina calculada con el esquema de infiltración de Green y Ampt, considerando los parámetros de conductividad hidráulica a saturación (k_s) y el frente húmedo de mojado (h_f), mismo que pueden ser calibrados de acuerdo con las condiciones existentes de lámina de riego, pendiente, coeficiente de rugosidad de Manning, humedad inicial del suelo, entre otros.

El gasto óptimo (q_g) para el surco, se considera como base al ancho entre surcos, considerando que el perímetro mojado del surco como el ancho del espejo del agua. Este gasto por surco en litros por segundo (l/s), es el que se considera para el diseño del conducto emisor para cada salida de la TCSM. La siguiente figura 3 muestra el resultado del diseño del riego por gravedad para surcos y melgas, en una parcela de 8.41 ha (290 m de ancho x 290 m de largo), surcos con espaciamiento de 0.9 m, gasto total de 80 l/s, pendiente $S_o = 0.004$ m/m a lo largo del surco, resultando un gasto por surco de 1.25 l/s, regando 64 surcos a la vez, en la tirada de riego.

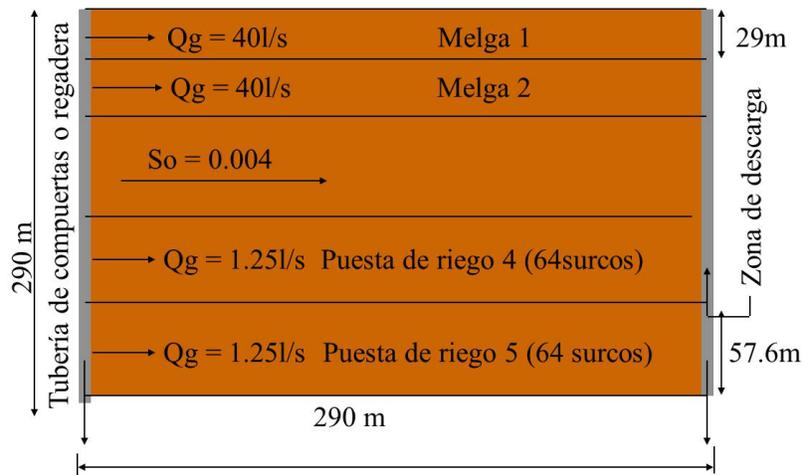


Figura 3. Esquema del riego por gravedad con el diseño del software RIGRAV.

Diseño hidráulico del sistema de riego “Velázquez®”

El presente trabajo considera establecer el método de cálculo paso a paso SBS (por sus siglas en inglés), para resolver numéricamente, en un primer cálculo la hidráulica del lateral con y sin pendiente, asumiendo la ecuación del emisor para el cálculo de los gastos que transitan por cada tramo de la tubería conducción con salidas múltiples (TCSM). De esta manera, los gastos de emisión y las cargas de operación calculados a lo largo del lateral son más representativos de la hidráulica de tuberías con salidas múltiples. La solución del último emisor, permite obtener de manera iterativa, el cálculo de los siguientes emisores hasta completar la tirada de riego.

El algoritmo considera establecer el equilibrio de cargas de operación en la entrada de las mangueras de polietileno, suponiendo gastos de emisión al final del lateral siguiente, hasta que, de manera iterativa, se cumpla con la carga de operación al inicio de la manguera y del distribuidor. La solución para la ecuación general del gradiente de la línea de energía, se realiza mediante una ecuación general que considera utilizar cualquier fórmula de resistencia al flujo.

Análisis hidráulico del emisor

El cálculo hidráulico se desarrolla desde el último tramo con el gasto de último emisor o manguera (q_o) hacia el inicio del lateral. El método de cálculo paso a paso (SBS) para el lateral enterrado, establece como condición inicial que el gasto del primer tramo Q_i , es similar al gasto del último emisor q_o .

El gasto del emisor se calcula con relación a los diferentes diámetros de manguera utilizados en campo, que pueden ser desde $\frac{1}{2}$ " (12.5 mm) hasta 2" (50 mm). El siguiente gráfico de la figura 4, muestra con base a la ecuación de pérdidas de

carga de Darcy-Weisbach, la curva carga- gasto que resulta para las diferentes condiciones de operación del orificio a descarga libre, así como la ecuación obtenida mediante regresión lineal simple, con un muy buen grado de aproximación.

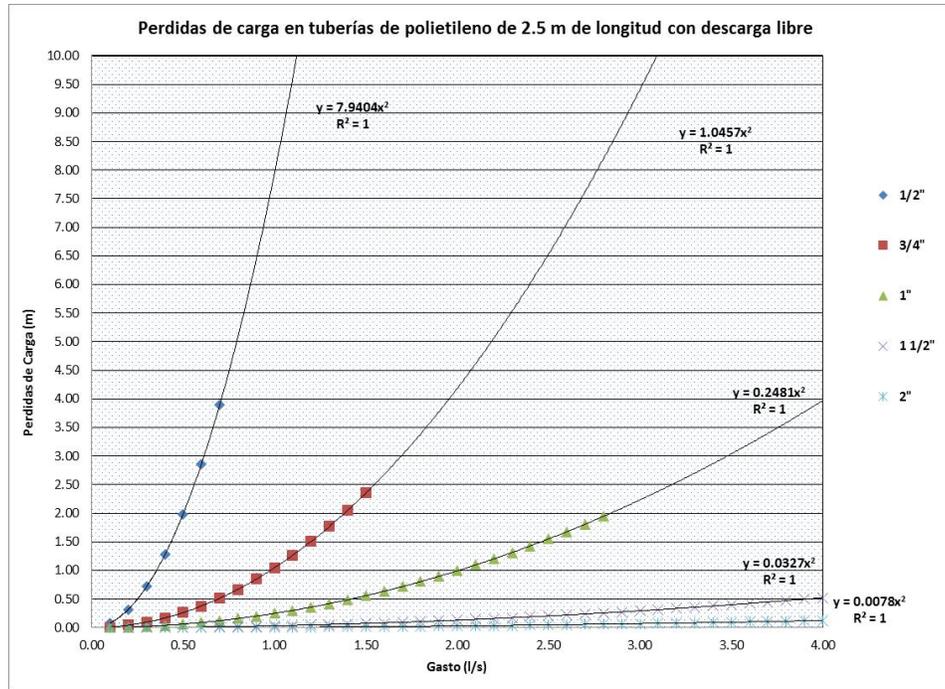


Figura 4. Ajuste teórico de la curva de pérdidas de carga en tuberías de polietileno de 2.5 m de longitud y descarga libre.

La regresión lineal para el diseño hidráulico fue estimada en función de la carga de inicio del último emisor con base en la ecuación de gasto del orificio y su longitud de manguera (2.5 m), con un gasto de operación (q_i) obtenido de su ecuación respectiva del gráfico de la figura 4 anterior.

El método de cálculo paso a paso para el lateral, establece como condición inicial que el gasto del primer tramo Q_i , es similar al gasto del último emisor q_o . Los gastos (Q_i) que transitan por cada tramo del lateral se calculan sumando los gastos de emisión calculados a partir de la ecuación

$$Q_i = Q_{i-1} + q_i \tag{1}$$

Análisis hidráulico de la tubería de conducción con salidas múltiples (TCSM)

Para iniciar el cálculo de la TSCM, la carga del último emisor, es obtenida a partir de la ecuación del emisor (2), proponiendo el gasto de emisión de diseño (q_o), despejando el valor de la misma, de la manera siguiente: (Montiel, 2008)



$$H_o = \left[\frac{q_o}{K} \right]^{\frac{1}{x}} \quad (2)$$

Los valores de K y de x son los obtenidos de las ecuaciones de regresión lineal de la figura 4. K es variable ya que depende del diámetro de manguera, rugosidad y su longitud y x tiende a 2.

En un primer cálculo, se asume el valor de q_o , igual al gasto obtenido del paso 1 "Diseño del Riego por gravedad", que para el caso del ejemplo de la figura 3 resultó de 1.25 l/s y para H_o se aplica la ecuación (2).

La ecuación general para la solución numérica de un lateral presurizado utilizando un esquema computacional SBS, en donde se calculan las pérdidas por fricción en cada tramo del lateral, utilizando el gasto cada (Q_i), circulante en cada tramo i, es la siguiente: (Montiel, 2006).

$$H_i = H_{i-1} + (Z_{i-1} - Z_i) + C_{i-1} E_s \frac{Q_{i-1}^m}{D_i^n} \quad (3)$$

Dónde: E_s es el espaciamiento entre emisores (m) y D_i es el diámetro interno (m) del lateral, Q_{i-1} = gasto del lateral en el tramo i-1; H_i , H_{i-1} , = carga de presión de presión de entrada a los emisores i, i-1; Z_i , Z_{i-1} corresponden a la carga de elevación considerada en la entrada de los emisores i, i-1. C_{i-1} corresponde al factor de fricción, aplicado de acuerdo al régimen hidráulico presentado en el tramo i-ésimo del lateral y que depende de la ecuación general de resistencia que se utilice.

Considera además las unidades y constantes generales de cálculo de la ecuación general de resistencia que se trate. El valor de m corresponde al exponente de la velocidad en la ecuación de fricción que se trate, así como el valor de n, el cual corresponde al exponente del diámetro, de acuerdo con la ecuación general de resistencia que se utilice. Cuando se utiliza la ecuación de Darcy - Weisbach, m=2 y n=5, y la ecuación (3) se convierte a la forma:

$$H_i = H_{i-1} + (Z_{i-1} - Z_i) + f_{i-1} \frac{8E_s Q_{i-1}^2}{g\pi^2 D_i^5} \quad (4)$$

Donde ahora f_{i-1} = factor de fricción del tramo i-1 del lateral, y representa las pérdidas de carga por fricción de la tubería (H_f) de cada tramo que se calcula, tal y como se muestra en la siguiente figura 5.

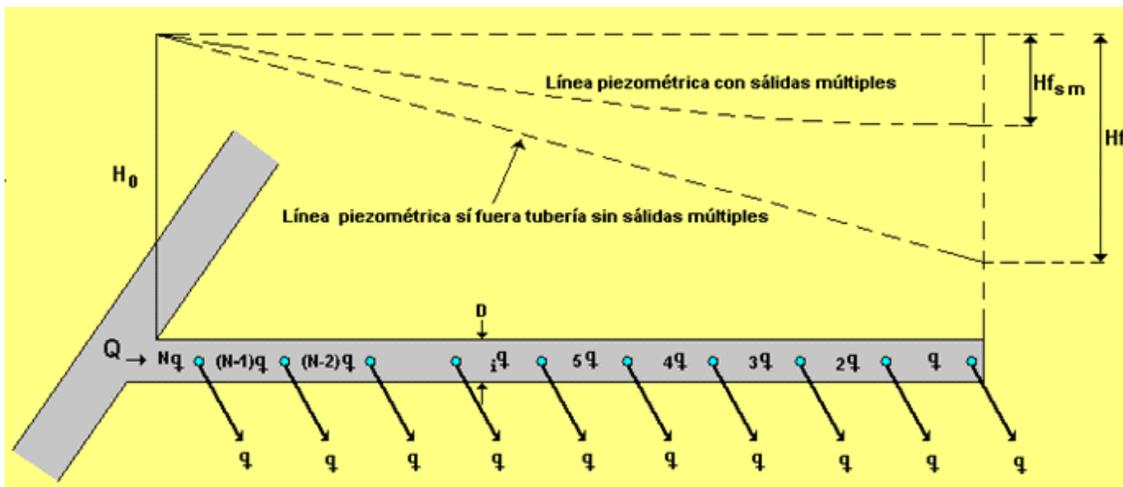


Figura 5. Líneas piezométricas para tubería ciega y una TCSM para el diseño hidráulico de laterales de riego. Peña (2004).

Para la aplicación de la ecuación anterior en el distribuidor, el primer paso en la ejecución de los cálculos utiliza el gasto del último lateral calculado (Q_n) como el gasto acumulado del $j-1$ ésimo (Q_{j-1}) tramo del distribuidor, es decir:

$$Q_n = Q_{j-1} \tag{5}$$

En el caso del último tramo del sistema de riego, una vez concluido el cálculo de la TCSM, se tiene un tramo de conducción ciego sin salidas, en donde el gasto total es igual al acumulado y el cálculo de las pérdidas de carga se realiza como el de una tubería ciega con gasto constante y con su factor de fricción dependiendo de su rugosidad relativa.

Conclusiones

Se realizó un algoritmo de cómputo para analizar varios casos de diseño de laterales a baja presión a diámetro y gasto variable en función de la carga disponible, para estimar la carga hidráulica en la entrada del lateral (H_e) con pendiente o sin pendiente, tal y como se observa en el siguiente Cuadro 1, en donde se tiene un caso de un gasto inicial de 1.5 l/s por surco, diámetros telescopiados de 4" (96 mm), 6" (154 mm) y 8" (192.7 mm) 25 salidas y pérdidas de carga totales de 1.05 m.

Cuadro 1. Resultado del algoritmo de cómputo para el diseño del sistema de riego.

Tramo TCSM	Emisor					Tubería de conducción con salidas múltiples (TCSM)					
	q	hf	z	Lp	Q	D	V	Hf	Lp _(n+1)	Long.	
	l/s	m	m	m	l/s	mm	m/s	m	m	m	
n	1	1.50	0.64	10.00	10.64	1.5	96	0.21	0.00	10.64	1.60
n-1	2	1.50	0.64	10.00	10.64	3.0	96	0.41	0.00	10.64	3.20
n-2	3	1.50	0.64	10.00	10.64	4.5	96	0.62	0.00	10.65	4.80
n-3	4	1.50	0.64	10.00	10.65	6.0	96	0.83	0.01	10.65	6.40



Tramo TCSM		Emisor				Tubería de conducción con salidas múltiples (TCSM)					
		q	hf	z	Lp	Q	D	V	Hf	Lp _(n+1)	Long.
		l/s	m	m	m	l/s	mm	m/s	m	m	m
n-4	5	1.51	0.65	10.00	10.65	7.5	96	1.04	0.01	10.66	8.00
n-5	6	1.53	0.66	10.00	10.66	9.0	96	1.25	0.02	10.68	9.60
n-6	7	1.54	0.68	10.00	10.68	10.6	96	1.46	0.02	10.70	11.20
n-7	8	1.57	0.70	10.01	10.70	12.2	154	0.65	0.00	10.71	12.80
n-8	9	1.57	0.70	10.01	10.71	13.7	154	0.74	0.00	10.71	14.40
n-9	10	1.57	0.70	10.01	10.71	15.3	154	0.82	0.00	10.72	16.00
n-10	11	1.58	0.71	10.01	10.72	16.9	154	0.91	0.01	10.72	17.60
n-11	12	1.58	0.71	10.01	10.72	18.5	154	0.99	0.01	10.73	19.20
n-12	13	1.59	0.72	10.01	10.73	20.1	154	1.08	0.01	10.74	20.80
n-13	14	1.60	0.73	10.01	10.74	21.6	154	1.16	0.01	10.74	22.40
n-14	15	1.61	0.73	10.01	10.74	23.3	154	1.25	0.01	10.76	24.00
n-15	16	1.62	0.74	10.01	10.76	24.9	154	1.34	0.01	10.77	25.60
n-16	17	1.63	0.75	10.01	10.77	26.5	154	1.42	0.01	10.78	27.20
n-17	18	1.64	0.77	10.01	10.78	28.1	154	1.51	0.02	10.80	28.80
n-18	19	1.66	0.78	10.01	10.80	29.8	192.7	0.92	0.00	10.80	30.40
n-19	20	1.66	0.79	10.02	10.80	31.5	192.7	0.97	0.00	10.81	32.00
n-20	21	1.67	0.79	10.02	10.81	33.1	192.7	1.02	0.01	10.81	33.60
n-21	22	1.67	0.79	10.02	10.81	34.8	192.7	1.08	0.01	10.82	35.20
n-22	23	1.68	0.80	10.02	10.82	36.5	192.7	1.13	0.01	10.82	36.80
n-23	24	1.68	0.80	10.02	10.82	38.2	192.7	1.18	0.01	10.83	38.40
n-24	25	1.69	0.81	10.02	10.83	39.9	192.7	1.23	0.01	10.84	40.00
n-25	26	1.70	0.82	10.02	10.84	41.6	192.7	1.28	0.01	10.85	41.60
TC	TC	0	0.82	10.10	10.92	41.6	192.7	1.28	0.84	11.76	201.60
						41.6	192.7	1.28	1.05	1.12	201.60

El siguiente gráfico muestra los resultados obtenidos para la tabla 1 anterior.

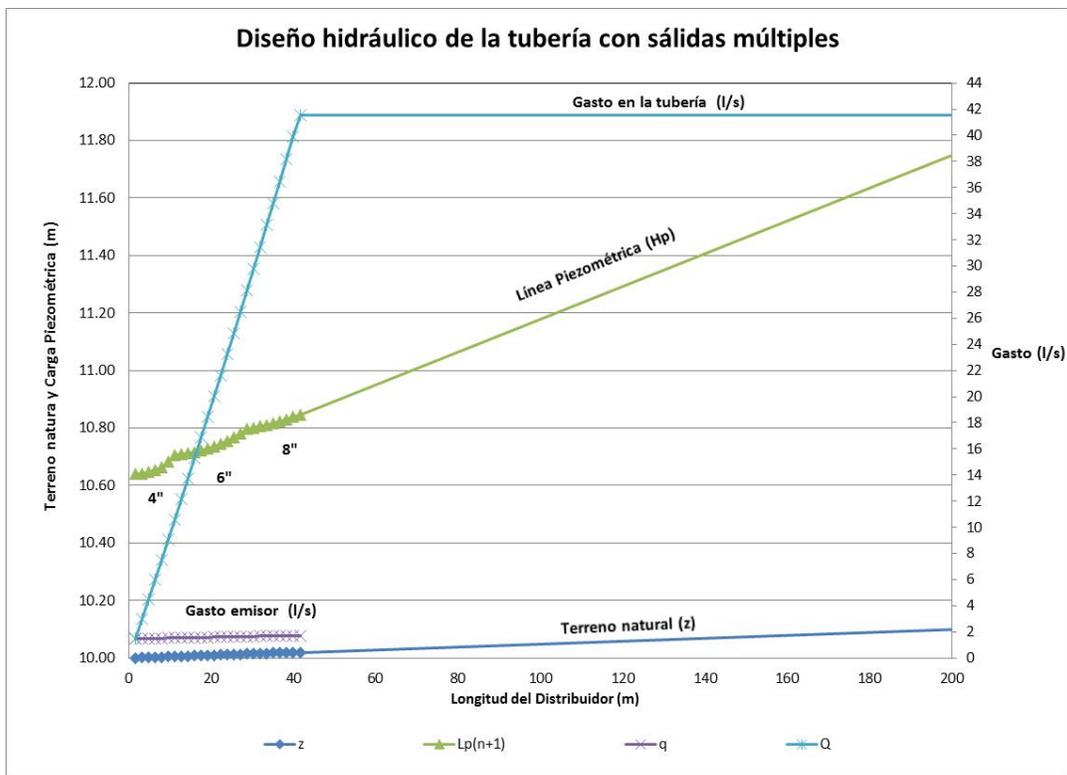


Figura 6. Resultados del diseño hidráulico de la TCSM en el Sistema de Riego “VELAZQUEZ®”.

Con el último emisor en la cota 10, la cota piezométrica tiene un valor de 10.64 m y en el hidrante, a una longitud de 200 m al inicio de la parcela, la cota piezométrica es de 11.76 m. carga que debe satisfacer el canal o depósito de agua al inicio del sistema.

En el cuadro 2 muestra los resultados obtenidos para un gasto parcelario de diseño de 60 l/s en el hidrante con diámetros sin telescopiar de 8” (192.7 mm) y 10” (241 mm), y longitudes de tubería de 100, 150 y 200 m desde el hidrante parcelario con un gasto por surco de 2.22 l/s y diámetro de manguera de 1.5” (38 mm). Los resultados muestran las cargas necesarias en función de cada diámetro y longitud de tubería.

Cuadro 2. Resultados de cálculo hidráulico para el diseño de una tubería con salidas múltiples en RIGRAT

Datos generales				Tubería con salidas múltiples						Tubería lisa		He (m)
Q (l/s)	L (m)	ΔH (m)	D (mm)	dc (m)	Lc (m)	N	F	hf (m)	h (m)	L2 (m)	Hf ₂ (m)	
60	100	0.00	192.7	0.75	20	27	0.370	0.149	0.10	80	1.42	1.73
60	150	0.00	192.7	0.75	20	27	0.370	0.149	0.10	130	2.31	2.62
60	200	0.00	192.7	0.75	20	27	0.370	0.149	0.10	180	3.20	3.50
60	100	0.00	241.0	0.75	20	27	0.370	0.050	0.10	80	0.48	0.74
60	150	0.00	241.0	0.75	20	27	0.370	0.050	0.10	130	0.78	1.03
60	200	0.00	241.0	0.75	20	27	0.370	0.050	0.10	180	1.08	1.33



Se tiene entonces una propuesta de un nuevo sistema de riego a baja presión que junto con el diseño del riego por gravedad en un paquete tecnológico que incluye nivelación de tierras, se incrementa la eficiencia actual de los terrenos en un mínimo de un 20%.

Se concluye en la necesidad de seguir evaluando la variación del gasto del emisor debido a la carga hidráulica natural de posicionamiento sobre el emisor, ya que no tiene regulador de gasto al ser descarga libre, lo que dificulta la operación del riego.

Referencias bibliográficas

CONAGUA (2015). Manual de Operación del Programa de Rehabilitación, Modernización, Tecnificación y Equipamiento de Distritos de Riego y Temporal Tecnificado, 2015. Componente Riego por Gravedad Tecnificado (RIGRAT). Gerencia de Distritos de Riego. Edición 2015 Comisión Nacional del Agua. México D.F.

Montiel G. Mario. Peña P. Efrén y Anzures B. Roberto. (2006). “Solución Numérica al Diseño de Sistemas de Riego Presurizado”. XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Cd. Guyana Venezuela. Memorias del Congreso. Vol.1. Pp- 513-514.

Montiel G. Mario, Andrade A y P. Efrén. (2008). “Análisis del diseño hidráulico y la uniformidad de emisión en sistemas de riego por goteo a baja presión (LPS). XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Cartagena de Indias, Colombia. Memorias del Congreso. Vol.1. Pp- 423-424.

Peña E. (1994), Análisis hidráulico de sistemas de riego por goteo. IAHR-AIHH Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Puebla, México. Vol.1 pp-345-349.