



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

## FACULTAD DE INGENIERÍA

### COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO

### T E S I S

Como requisito para obtener el grado de:

**INGENIERO CIVIL**

P R E S E N T A

**GERARDO RUIZ SOLORIO**



DIRECTOR DE TESIS  
**DR. GABRIEL ECHÁVEZ ALDAPE**

MÉXICO, D.F.

ABRIL 2005

m. 344129



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**A MIS PADRES**

*Joaquín Ruiz Cortés*

*María Elena Solorio López*

Autorizo a la Secretaría de Educación Pública de la  
UNAM a Otorgar a la Universidad Nacional Autónoma de México el  
derecho de reproducción de esta obra en su totalidad.  
NOMBRE: Gerardo Ruiz Solorio  
FECHA: 16 de mayo del 2005  
FIRMA: 

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1. ANTECEDENTES .....</b>	<b>3</b>
1.1 RAZONES DE LA NECESIDAD DE AHORRAR AGUA.....	3
1.1.1. Población Mundial.....	3
1.1.2 Necesidades de alimentación.....	4
1.1.3 Tipo de alimentación .....	4
1.1.4 Tierra disponible para producir el alimento.....	5
1.1.5 Alimentos producidos.....	5
1.2 NECESIDADES DE AGUA.....	6
1.2.1 Necesidad de agua para diferentes cosechas.....	6
1.2.2 Sistemas de riego y eficiencia.....	7
<b>2. SISTEMA DE RIEGO PRESURIZADO DE BAJA CARGA (RPBC).....</b>	<b>10</b>
2.1 CONCEPTOS GENERALES DEL SISTEMA DE RIEGO.....	10
2.2 EMISORES EN EL SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO.....	13
2.2.1 Definiciones.....	13
2.2.2 Requerimientos básicos .....	13
2.3 PÉRDIDA DE CARGA POR CONEXIÓN .....	14
2.3.1 Tipos de conexiones .....	14
2.4 COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE FABRICACIÓN.....	15
2.5 SENSIBILIDAD A LAS OBTURACIONES .....	18
2.6 SENSIBILIDAD A LA TEMPERATURA .....	19
<b>3. CONSIDERACIONES TEÓRICAS.....</b>	<b>22</b>
3.1 DEFINICIÓN DEL SISTEMA.....	22
3.2 HIDRÁULICA DEL LATERAL .....	23
3.3 HIDRÁULICA DEL EMISOR.....	24
3.3.1 Ecuación de Hagen-Poiseuille .....	24
3.3.2 Longitud de transición .....	27
3.3.3 Coeficiente de Coriolis .....	28
3.3.4 Coeficiente de pérdida por entrada .....	29
3.3.5 Tensión superficial .....	29

<b>4. EQUIPO EXPERIMENTAL Y MEDICIONES.....</b>	<b>31</b>
4.1 INSTALACIÓN PARA ESTUDIAR LAS PÉRDIDAS EN LA LATERAL .....	31
4.2 INSTALACIÓN Y PRUEBAS EN LOS EMISORES.....	32
4.2.1 Vertedor Circular .....	32
4.2.2 Recipiente Colector .....	32
4.2.3 Tubo horizontal de carga .....	32
4.2.4 Dispositivo de regulación .....	33
4.2.5 Transición .....	33
4.2.6 Lateral de prueba .....	33
4.2.7 Unión lateral – emisor .....	33
4.2.8 Emisor.....	34
4.2.9 Limnómetro graduado .....	34
4.2.10 Sistema de recirculación de agua.....	35
4.3 MEDICIONES.....	37
4.3.1 Estimación de la uniformidad de riego .....	37
4.4. INSTALACIÓN PARA EL ESTUDIO DE LOS EMISORES.....	38
4.4.1 Mediciones en la instalación de laboratorio.....	38
4.4.2 Pruebas efectuadas.....	39
4.4.3 Pruebas de tensión superficial .....	50
<b>5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>51</b>
5.1 HIDRÁULICA DE LAS TUBERÍAS LATERALES .....	51
5.2 HIDRÁULICA DE LOS EMISORES .....	52
5.2.1 Coeficiente de pérdida de entrada para $li < le$ .....	53
5.2.2 Coeficiente de pérdida de entrada para $li > le$ .....	53
5.3 GRÁFICAS AUXILIARES.....	54
5.4 COMPARACIÓN CON OTROS RESULTADOS DE SISTEMAS SIMILARES .....	55
<b>6. DISEÑO DE LA RED .....</b>	<b>59</b>
6.1 LATERALES .....	59
6.1.1 Tipos.....	59
6.1.2 Materiales .....	59
6.1.3 Tubo de PVC .....	60
6.1.3.1 Características generales, geométricas, térmicas y químicas del PVC.....	61
6.1.3.2 Características hidráulicas del PVC.....	62
6.1.4 Tubo de polietileno (PE).....	62
6.1.4.1 Características generales geométricas, térmicas y químicas de PE.....	62

6.1.4.2 Características hidráulicas .....	63
6.2 EMISORES.....	63
6.2.1 Tipos de emisores y diseño propuesto .....	63
6.2.1.1 Gotero.....	63
6.2.1.2 De largo conducto.....	63
6.2.1.2 De laberinto .....	64
6.2.1.3 De orificio.....	64
6.2.1.4 Vortex.....	65
6.2.1.5 Autocompensantes.....	65
6.2.1.6 Autolimpiantes .....	65
6.2.1.7 Sistemas integrados .....	66
6.2.1.8 Tuberías emisoras .....	66
6.2.2 Reguladores de presión y gasto .....	67
6.2.2 Gráficas de diseño .....	69
6.2.2.1 Pérdidas de carga despreciables en la lateral .....	69
6.3 GRÁFICAS DE DISEÑO, COMBINADAS LATERAL-EMISOR .....	76
6.4 PROPUESTA DE UN NUEVO TIPO DE GOTERO .....	125
<b>7. MANUAL DE USUARIO .....</b>	<b>127</b>
7.1 LEVANTAMIENTO DEL PREDIO.....	127
7.2 SELECCIÓN DEL CULTIVO Y SUS NECESIDADES DE AGUA .....	127
7.2.1 Aspectos relacionados con los cultivos .....	127
Evapotranspiración .....	127
7.2.2 Agua a utilizar y cuando regar.....	128
7.2.3 Aspectos relacionados con el suelo .....	129
7.3 DISEÑO DE LAS TUBERÍAS.....	130
7.4 EJEMPLO NUMÉRICO.....	131
<b>8. CONCLUSIONES .....</b>	<b>135</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>137</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>141</b>
A.1 PROFUNDIDAD RADICULAR (PR).....	141
A.2 DURACIÓN DE LA FASE DE CRECIMIENTO.....	145

# INTRODUCCIÓN

En amplias zonas de la República Mexicana, donde se tienen grandes extensiones áridas y semiáridas, una limitación importante para las actividades económicas y para mejorar la calidad de vida de la población, es la cantidad de agua disponible de buena calidad. Además, dado el creciente consumo de agua a nivel mundial y teniendo en cuenta que el rubro más importante de consumo de agua es el uso agrícola, es de gran importancia desarrollar sistemas que permitan ahorrar agua de riego utilizándola en forma más eficiente. Estos sistemas además del objetivo anterior, deben ser de tecnología apropiada, o sea satisfacer los siguientes requisitos: bajo costo, ser de tecnología accesible y de bajo consumo de energía en la operación.

Un sistema que permite cumplir con las condiciones anteriores es el riego localizado, que se ha venido desarrollando desde hace aproximadamente 30 años y que consiste en la aplicación del agua en una zona restringida del volumen radicular; al no mojarse la totalidad del suelo y utilizar pequeños caudales con la frecuencia necesaria, este riego permite obtener altas eficiencias en el uso del agua, muy superiores a las utilizadas con los sistemas de riego tradicionales como: gravedad, aspersión y otros.

Una variante del riego localizado es el riego por goteo y un tipo de este último es el Riego Presurizado de Baja Carga (RPBC), objeto de este trabajo, donde el agua se aplica por medio de una extensa red de tuberías de plástico, PVC, o de las distintas variedades de conductos de polietileno, al que están conectadas mangueras emisoras que pueden estar colocadas sobre elevadores (raisers), sobre la superficie de suelo o enterradas a poca profundidad, y cuya descarga se controla por medio de su misma longitud, o por medio del ascenso o descenso de su extremo final.

En el RPBC, se trabaja con cargas de 1 m y menores, a diferencia del riego por goteo tradicional donde se utilizan cargas de alrededor de 10 a 20 m, que finalmente hay que disipar por medio de goteros o aspersores. El emisor o gotero es una pieza de costo mucho menor que el gotero tradicional, que se basa, generalmente, en conductos capilares que fácilmente se obstruyen con impurezas y depósitos de sales, y que por lo general son productos de importación. Otra ventaja es que dado que se emplean emisores con diámetros mayores que el capilar se reduce considerablemente, e inclusive puede eliminar, la necesidad de filtración, y facilita la ferti-irrigación o sea la aplicación de fertilizantes, fungicidas y complementos en general en los cultivos utilizando a la misma agua como vehículo.

En este trabajo, se dan razones que muestran la urgencia de ahorrar agua de riego; se presenta el sistema de Riego Presurizado de Baja Carga (RPBC); se determinan los coeficientes de pérdidas de carga tanto para las líneas laterales como para los emisores por medio de consideraciones teóricas y de mediciones en una instalación experimental; se dan indicaciones y gráficas para el diseño de la red completa y, finalmente, para hacer algo práctico y utilizable, se concluye con un manual del usuario y con las conclusiones pertinentes.



# 1. ANTECEDENTES

## 1.1 Razones de la necesidad de ahorrar agua

### 1.1.1. Población Mundial

Cuánta comida tendrá que ser producida en el futuro dependerá, en gran parte, en el número de las personas que tendrán que ser alimentadas. Estimaciones de poblaciones futuras abundan y varían grandemente. Si se acepta en el año 2000 una población de 6 mil millones de personas (un asombroso aumento de 4.4 mil millones en el siglo XX exclusivamente), para el año 2050, la estimación de acuerdo a la ONU es que la población excederá 8.9 mil millones de personas, con un rango de variación de entre 7.3 y 10.7 mil millones, o sea una diferencia de más de 3 mil millones personas. En la Figura 1.1 se muestra el aumento en las poblaciones globales y regionales entre 1750 y 2050, usando el valor medio de la Organización de las Naciones Unidas proyectadas para 2050. Este inmenso aumento, incluso ignorando todas las incertidumbres involucradas, complica la planificación y hace dudar de si habrá solución que satisfaga las necesidades de alimentación adecuada para las poblaciones futuras.

Por otra parte, el rango de fertilidad, medido como el número de niños por mujer, ha descendido rápidamente en algunas regiones, particularmente donde la educación, planificación familiar, despenalización del aborto y anticonceptivos se han hecho disponibles. Pero en otras regiones, el crecimiento demográfico acelerado continúa. Parece así que probablemente el mundo tendrá 3 mil millones más personas que alimentar -y potencialmente hasta como 4.7 mil millones más- para 2050. Y, además, el 95 % del aumento de la población estarán en los países en desarrollo donde los problemas de insuficiencia y escasez de comida y agua ya existen.

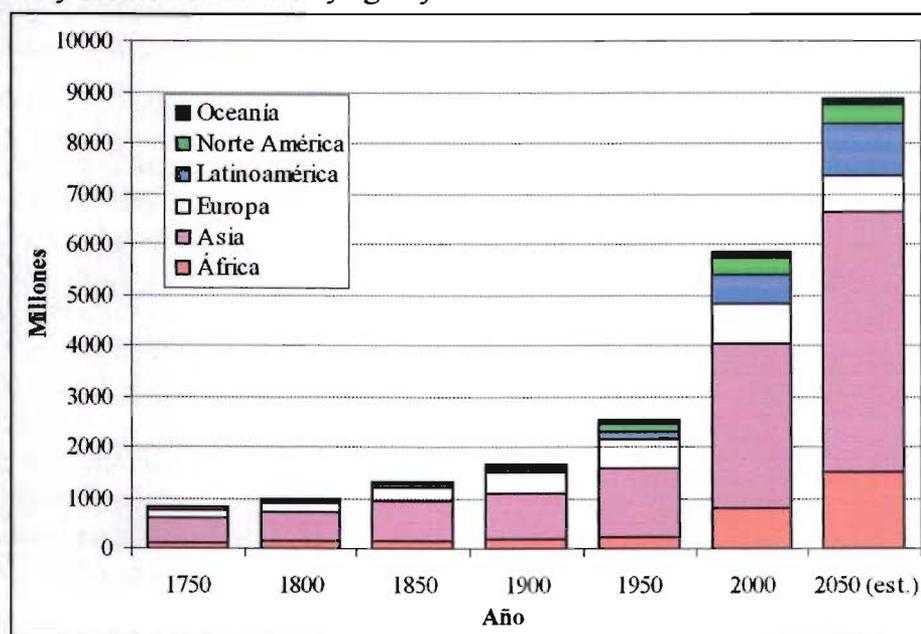


Figura 1.1. Población mundial por región 1750-2050.

### **1.1.2 Necesidades de alimentación**

Tan importante como el número de personas, es cuánta comida estas personas necesitarán y desearán. Los países más desarrollados hacen una comida más abundante que la necesaria ante la insuficiencia de la gran mayoría pobre. La United Nations Food and Agriculture Organization (UNFAO) establece como requisito mínimo para una vida saludable y productiva de entre 2,200 a 2,300 calorías por persona por día. Si la población mundial en 2050 está entre 7.3 y 10.7 mil millones personas, satisfacer un requisito calórico mínimo de 2,200 calorías por día requerirán la producción de 16 a 24 billones de calorías consumibles por día en todo el mundo. Adoptando la estimación de la ONU de 8.9 mil millones personas, en 2050 el mundo tendrá que producir casi 20 billones de calorías consumibles por día, o sea 6 billones de calorías más que las 14 que produce actualmente

Hay ya una diferencia significativa entre cuánta comida se necesita para sobrevivir y cuánta comida consumen las poblaciones más ricas. La UNFAO estima que la media calórica por día varía de 2,190 en los países más pobres a 3,345 calorías en las naciones más industrializadas. El consumo medio actual en los 90s estaba alrededor de 2,670 calorías por persona por día. La comida, sin embargo, no se distribuye o consume uniformemente. Incluso hoy, alrededor de 830 millones de personas en 42 países reciben menos que el número mínimo de calorías requerido para una dieta saludable, de estos países 29 están en África y 6 en Asia.

### **1.1.3 Tipo de alimentación**

Otro factor que hay que considerar es el crecimiento rápido de centros urbanos acoplado con los ingresos crecientes en los sectores rural y urbano, que afectará las demandas de comida. La urbanización lleva sobre todo a un cambio de la dieta con preferencia por comidas más diversificadas y con más alimentos procesados, carnes, leches, vegetales y frutas.

Un factor crucial en las preferencias de comida que hay que considerar es el consumo creciente de carne lo que hace que el 40 % de la producción del grano mundial va al ganado alimentado. Una estimación del grano que alimenta al ganado en los Estados Unidos es que es equivalente a la cantidad necesaria para alimentar a 400 millones de personas en una dieta vegetariana. Producir esa carne requiere que cantidades importantes de ciertas cosechas se utilizan para los animales en lugar de los humanos, reduciendo el número global de las personas que el planeta puede apoyar.

Las estructuras del consumo de carne también cambian con el tiempo. Estos cambios tendrán un efecto dramático en las demandas de grano globales futuras y, finalmente, en las demandas de agua globales. De gran importancia en el futuro de ambas necesidades será el mayor consumo de carne en los países en desarrollo, donde los ingresos están aumentando rápidamente, por ejemplo China.

### **1.1.4 Tierra disponible para producir el alimento**

¿Cuánta tierra de siembra está disponible hoy o en plan de extenderse? Globalmente, aproximadamente 1,510 millones de hectáreas están bajo cultivo. Otros 3,000 millones de hectáreas se clasifican como de pastizales y praderas. En los países en desarrollo, aproximadamente 885 millones de hectáreas están actualmente en producción de cosecha. Mundialmente, hay más de 2,600 millones de hectáreas de tierra en que la cosecha podría lograr rendimientos razonables. En conjunto, la FAO estima que la expansión de tierra cultivable puede aumentar en un 21 por ciento para la producción de alimento para las poblaciones futuras del 2010. Mucha de la tierra cultivable esta ya en producción y mucha de la tierra sin cultivar restante está en áreas remotas.

Hay competencia creciente por la tierra, particularmente para desarrollo urbano y para uso industrial y comercial. La pérdida de tierras agrícolas está pasando en Indonesia, los Estados Unidos, China, y en otras partes.

Desgraciadamente, el crecimiento de área para cosechas no está manteniéndose al ritmo presente del crecimiento demográfico. El total de tierras cultivables per capita pasaron de 0.31 hectáreas por persona en 1983 a 0.26 hectáreas por persona sólo una década después, bajando a 0.25 hectáreas por persona en 2000. La media global de grano segado por persona era de 0.22 hectáreas por persona en 1950 y 0.16 hectáreas en 1981, y se redujo a 0.12 hectáreas en 2000.

### **1.1.5 Alimentos producidos**

Los rendimientos de la cosecha son normalmente estimados en peso o volumen de alimento producido por unidad de tierra de cultivo. Esta es una de las variables más sensibles en cualquier proyección de alimento futura. En 1995, un estudio de producción de alimento al año 2010, proyectó un 66 por ciento del crecimiento en la producción de alimento en los países en desarrollo para incrementar los rendimientos de los productos de cosecha. Entre 1960 y 1990, la producción de arroz, trigo, y maíz se doblaron, con aumentos mayores en Asia y América Latina, y aumentos menores en África. En Asia, los rendimientos del trigo aumentaron durante este periodo de 0.7 a 2.6 toneladas métrica por la hectárea. Los rendimientos actuales de arroz varia enormemente, de un promedio rural debajo de 4 t/ha a casi 7 t/ha. Estas diferencias llevan a algunas analistas a proyectar grandes mejoras. Otros notan, sin embargo, que los rendimientos buenos actuales simplemente no pueden lograrse en todas partes, debido al clima, a los factores agronómicos relacionados y a la cultura de la región.

En Asia donde el fertilizante, pesticida, y uso de la irrigación son altos, los granjeros se aproximan a los rendimientos máximos esperados para los tipos de cosecha actual. Los adelantos en la biotecnología, genética y micro irrigación de la cosecha pueden ayudar a dar marcha atrás a las tendencias desfavorables.

## 1.2 Necesidades de agua

### 1.2.1 Necesidad de agua para diferentes cosechas

Las diferentes cosechas requieren cantidades diferentes de agua. Las cosechas transpiran cantidades de agua que depende de sus requisitos fisiológicos, clima, condiciones de la tierra, y situación. El importe global de agua exigido para producir la comida depende de los tipos de cosechas que crecerán, sus requisitos de agua, y las prácticas agrícolas. Para obtener una tonelada de maíz requiere entre 1,000 y 2,000 m<sup>3</sup> de agua; una tonelada de arroz requiere de 2,000 a 5,000 m<sup>3</sup> de agua; una tonelada de algodón requiere tanto como 15,000 m<sup>3</sup> de agua. Los valores reales varían con una gama amplia de factores como la región, clima, método de irrigación, y otros. Como se puede ver en la Tabla 1.1.

Cosecha/Alimento	Requerimiento de agua (lt de agua por kilogramo de comida producido)
<b>Papa</b>	500 a 1,500
<b>Trigo</b>	900 a 2,000
<b>Alfalfa</b>	900 a 2,000
<b>Maíz</b>	1,000 a 1,800
<b>Sorgo</b>	1,100 a 1,800
<b>Soya</b>	1,100 a 2,000
<b>Arroz</b>	1,900 a 5,000
<b>Pollo</b>	3,500 a 5,700
<b>Carne</b>	15,000 a 70,000

Tabla 1.1. Requerimientos de agua para diferentes alimentos y cosechas.

Hay un gran potencial para aumentar el rendimiento de la cosecha en función del agua utilizada. Por ejemplo, la eficiencia del uso del agua de la producción de arroz puede ser aumentada controlando las pérdidas en los campos de arroceros, sembrando arroz directamente en los campos y explorando tipos de cosecha hídricos. Así, los tipos de arroces mejorados pueden reducir las necesidades de agua de un 20 a 30 por ciento. Cuando se combina con un nuevo tipo de irrigación y sembrado, la cantidad global de agua exigida para crecer el arroz se reduce hasta en un 50 por ciento.

En la Figura 1.2 Se muestra la evolución global del uso del agua hasta el año 2025, ahí se puede apreciar cómo el uso agrícola es el mayor consumo.

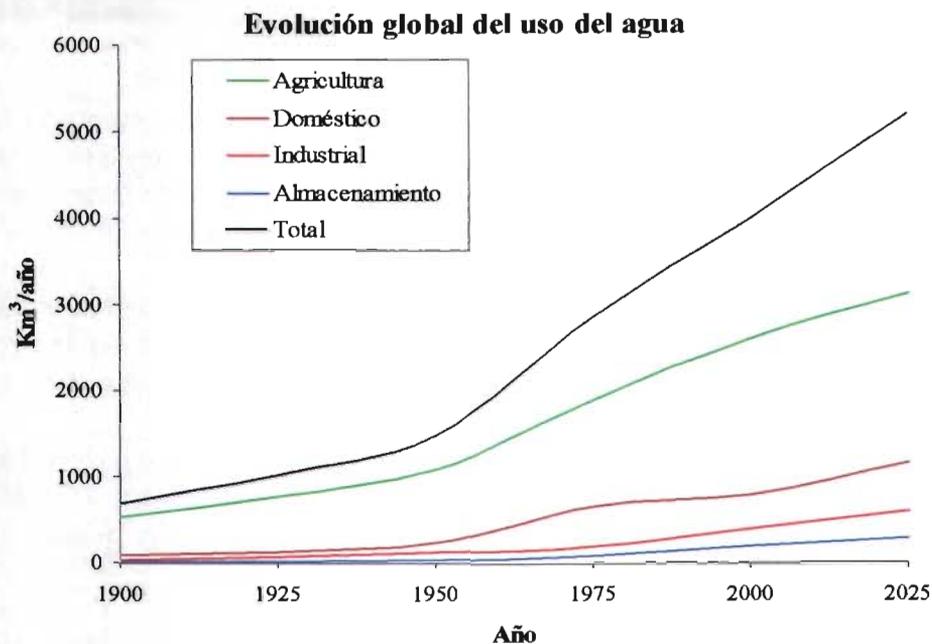


Figura 1.2. Evolución global del uso del agua a nivel mundial. Importancia del uso agrícola respecto de otros rubros, Shiklomanov, I.A. (1999).

### 1.2.2 Sistemas de riego y eficiencia

Por lo anterior, es inobjetable la necesidad de mejorar el uso de agua agrícola. Sin ninguna duda, una de las mayores preocupaciones de los analistas del agua es el alto crecimiento aparente del consumo de agua en la agricultura, lo que la hace inutilizable para otros usos.

Hay muchas formas de irrigación y tipos de tecnología de la irrigación, clasificados desde la irrigación controlada pobremente hasta el control por computadora en la irrigación por goteo. En la Tabla 1.2 se clasifican los diferentes métodos de irrigación típicos. Las diferentes cosechas requieren diferentes tipos de irrigación. Las tecnologías de la irrigación tienen diferentes eficacias y diferentes costos. La eficiencia con que se irrigan varía de región a región, además de la práctica agrícola y de la tecnología. En muchos lugares menos de la mitad de toda el agua aplicada a un campo es usada productivamente por las plantas. El resto se pierde en evaporación improductiva o va al agua subterránea donde puede que no se recupere para otros usos.

En años recientes ha habido un interés creciente para mejorar la comprensión de los conceptos de eficacia, evapotranspiración y uso de agua agrícola. Se han señalado que hay una diferencia importante entre las eficacias en granja y las eficacias de los sistemas globales en la agricultura. Esta distinción entre la eficacia del campo y la eficacia de riego por encharcamiento es importante y, bajo ciertas circunstancias, es muy útil. En años recientes ha sido aplicado en Asia y África. Entre otras cosas, esta distinción puede ayudar a identificar donde las mejoras en eficiencia del uso del agua puedan ser más apropiadas y valiosas.

<b>TIPOS DE SISTEMAS DE IRRIGACIÓN</b>	
<b>Irrigación de superficie o de campo</b>	Inunda o se usa ampliamente en grandes áreas, debido al importante bajo costo y más experiencia.
<b>Irrigación por surco</b>	Practicada desde los tiempos antiguos, involucra la forma de cavar en forma de U o V los surcos en la tierra irrigada.. Tiene el inconveniente de que se forman estanques de agua en el campo y se evapora improductivamente al aire e infiltra al agua subterránea.
<b>Riego por bordes</b>	La tierra se inunda en grandes longitudes paralelas, separadas por bancos de tierra construidos a lo largo en la dirección de pendiente de la tierra. Los flujos de agua van del punto más alto al más bajo.
<b>Irrigación por charcos</b>	Es similar a la irrigación por bordes pero incluye bancos de tierra construidos de forma entrecruzada a aquellos usados para la irrigación de bordes, dividiendo un campo en una serie de estanques que pueden irrigarse separadamente.
<b>Sistemas por aspersión</b>	Varían en el tipo, capacidades, y costo. Los sistemas típicos incluyen bombas de agua, líneas principales, líneas menores, y cabezas de rociador. El rocío de agua encima de cosechas o superficies de tierra proporcionan una distribución igual de agua. Los rociadores son convenientes para una gama amplia de tierras, cosechas, y terrenos. Ellos pueden ser portátiles o permanentes. En los recientes años, una variedad amplia de tecnologías de rociador de precisión se ha desarrollado y se ha usado cada vez más ampliamente. Estos sistemas mejoran la habilidad de entregar el agua con precisión donde y cuando se necesite, a un costo superior que los rociadores tradicionales. Algunas fracciones del agua aplicada se pierden en la evaporación.
<b>Riego por goteo</b>	Involucra el uso de bajos volúmenes de agua en los emisores precisamente en el lugar donde se necesita para la cosecha. Los componentes de los sistemas por goteo incluyen bombas, filtros, líneas principales, líneas laterales, y emisores o cabezas de goteo. Pueden agregarse a menudo los químicos al agua, fertilizantes y aplicándose al mismo tiempo que se riega. Cuando el suelo tiene la suficiente humedad se supervisa cuidadosamente, para sí poder hacer un control en la aplicación de agua. Los sistemas de goteo son convenientes para las cosechas permanentes, como las viñas y huertos, y cada vez más se están aplicando para regar la cosecha. También se puede aplicar en cosechas de algodón y otros cultivos para los cuales se cumplan los requerimientos.

Tabla 1.2. Tipos de sistemas de irrigación.

Puede reducirse la evaporación y la transpiración de la planta con tecnologías diferentes y mejores políticas y prácticas agrícolas. Las reducciones en la evaporación pueden ser logradas disminuyendo la exposición superficial del agua freática, la evaporación de las tierras, y la malversación de agua de irrigación. Las reducciones en la transpiración pueden ser el resultado de los cambios en los tipos de la cosecha, la introducción de más eficiencia en el uso de agua, de barbecho, y de jubilación de la tierra.

El mejoramiento de la eficiencia del uso del agua en la agricultura permite producir más alimentos sin aumentar las demandas de agua globales. Además, las tecnologías más eficaces pueden reducir el costo de mano de obra, como se muestra en la Tabla 1.3, aunque tales ganancias requieren de educación, inversión, mejores cultivos y mejor administración del agua.

Método de irrigación	Tipo	Requerimientos de trabajo (horas por aplicación de irrigación por hectárea)
<b>Superficie</b>	Surco	1-3
	Riego con rebordes	0.5-1.5
	Irrigación por charcos	0.1-1
<b>Aspersión</b>	Laterales movidos a mano	1-2.5
	Laterales movidos por tractor	0.5-1
	Sistema movido por el mismo	0.05-0.3
	Sistema permanente	0.05-0.2
<b>Goteo</b>	Huerto	0.1-0.3
	Hilera	0.1-0.3

Tabla 1.3. Requerimientos de trabajo para diferentes tecnologías de irrigación.

Mientras es probable que la tendencia hacia la tecnología de la irrigación más eficiente continúe, es probable que un hueco permanezca entre la eficacia máxima teórica y la aplicación en campo real. A menudo, incluso sofisticados planes ignoran estos factores lo que reduce el potencial para reducir las pérdidas de agua.

Donde la precipitación estacional o el escurrimiento lo permite, como en los valles del río con tierras húmedas cultivadas, el suelo del valle, deltas de río, y tierras que se inundan periódicamente, ninguna tecnología de irrigación costosa puede ser necesarias. En cambio, métodos mejores que los tradicionales, como el Riego Presurizado de Baja Carga (RPBC) aquí propuesto, con eficiencias y ventajas, en general, muy superiores a los usuales puede mejorar los rendimientos de disponibilidad de agua y satisfacer las necesidades locales así como ayudar al desarrollo rural.



## **2. SISTEMA DE RIEGO PRESURIZADO DE BAJA CARGA (RPBC)**

### **2.1 Conceptos generales del sistema de riego**

El riego presurizado por goteo, también denominado usualmente como riego localizado o micro-irrigación, es la aplicación del agua al suelo en una zona más o menos restringida del volumen radicular. Se caracteriza básicamente por lo siguiente:

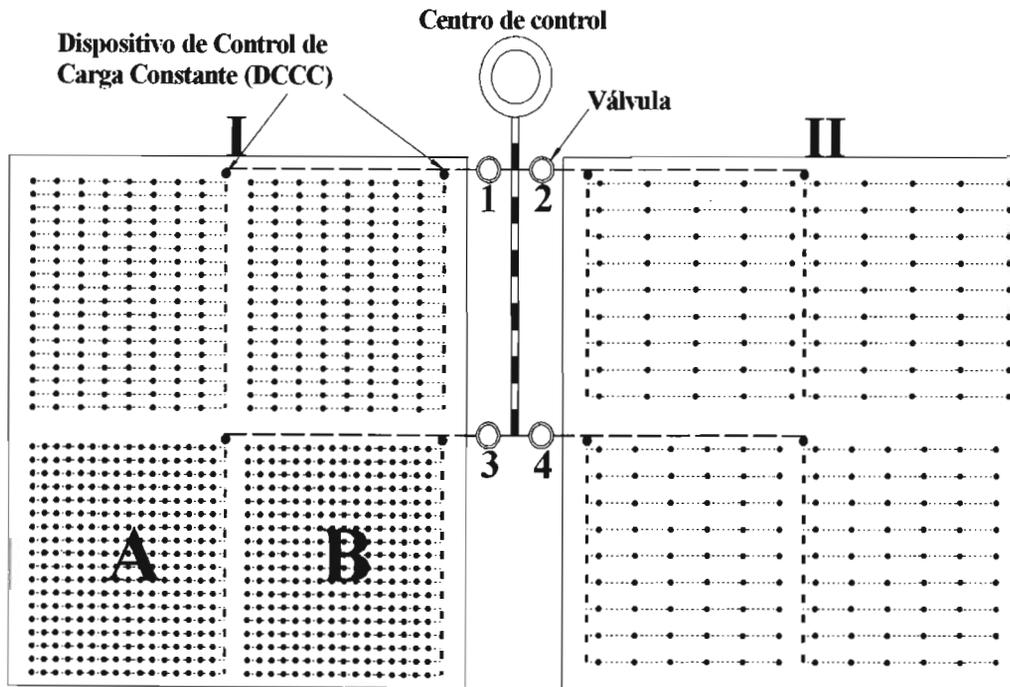
- No moja, en general, la totalidad del suelo, se aplica el agua sobre o bajo la superficie.
- Utiliza pequeños caudales a baja presión.
- Aplica el agua en la proximidad de las plantas a través de un número variable de puntos de emisión, que en algunos casos puede ser alto.
- Al reducir el volumen de suelo mojado disminuye la capacidad de almacenamiento de agua, consecuentemente, se opera con la frecuencia necesaria para mantener un alto contenido de humedad en el suelo (riego de alta frecuencia).

Aunque pueden diseñarse sistemas de riego modificando los sistemas convencionales de riego de superficie (inundación, infiltración, etc.), el RPBC puede ser comparado con instalaciones fijas a presión, que incluyen una serie de variantes tales como el goteo, el riego subterráneo, la difusión y la mini-aspersión.

El riego por goteo aplica el agua con caudales no superiores a 16 L/h por punto de emisión o metro lineal de manguera de goteo. El riego por difusores o mini-aspersores, considera sistemas con caudales generalmente inferiores a los 200 L/h por punto de emisión, con emisores que se denominan “difusores” cuando se trata de toberas fijas, y “mini-aspersores” cuando disponen de alguna parte que tiene un movimiento de rotación y su alcance efectivo no supera los 3 m. También existe el riego subterráneo que se caracteriza por la aplicación del agua bajo la superficie del suelo, con caudales bajos, generalmente similar al del riego por goteo. Este último, difiere del también llamado riego subterráneo, que consiste en regar mediante fluctuaciones del nivel freático.

Una instalación típica de riego por goteo o de micro-irrigación, la conforman el conjunto de mecanismos necesarios para aplicar el agua mediante gotas. Una instalación típica se compone de: estación de bombeo; centro de control con los filtros y equipos de fertilización; las tuberías principales, secundarias, terciarias y laterales, y emisores, válvulas, coples y demás piezas especiales. En el caso del RPBC se pueden conformar unidades modulares que pueden tener la forma mostrada en la Figura 2.1, en la cual se pueden diferenciar los componentes básicos siguientes:

- **Subunidad de riego.** Es la superficie que se riega simultáneamente desde un mismo punto donde se regula o controla la presión de entrada del agua, que lleva un dispositivo de control de carga constante (DCCC).
- **Unidad de riego.** Es la superficie formada por el conjunto de subunidades que se riegan simultáneamente desde un mismo punto donde se controla la dosis de agua a aplicar en cada riego.
- **Unidad operacional.** Es la superficie suma de las unidades de riego que funcionan simultáneamente desde un mismo centro de control.
- **Centro de control.** Es el conjunto de dispositivos que dominan toda la superficie de la instalación y pueden servir para filtrar el agua, tratarla, incorporar fertilizantes, controlar la presión, medir dosis de riego.



- |            |                      |              |                                 |
|------------|----------------------|--------------|---------------------------------|
| •          | Unión lateral-emisor | 1, 2, 3 y 4  | Unidades de riego               |
| — — — — —  | Tubería secundaria   | A y B        | Subunidades de riego            |
| •••••••••• | Tubería terciaria    | $I = 1 + 3$  | Unidades operacionales de riego |
| - - - - -  | Tubería lateral      | $II = 2 + 4$ |                                 |

Figura 2.1. Nomenclatura típica utilizada en el RPBC y en sistemas similares.

- **Tuberías principales.** Son las que transportan el agua desde el centro de control hasta las unidades de riego.
- **Tuberías secundarias.** Son las que, dentro de una unidad de riego, sirven a las distintas subunidades.
- **Tuberías terciarias.** Dentro de la subunidad de riego, son las que alimentan a las tuberías laterales.
- **Tubería lateral.** Son las tuberías que llevan conectados los emisores. Por ejemplo, en la nomenclatura de la Figura 2.1 se representa una instalación en la que puede verse el centro de control del que parte una tubería principal y de ella toman agua, a través de válvulas, cuatro unidades de riego. De cada válvula parte una tubería secundaria que alimenta a las subunidades de riego a través de un control de carga constante. De él parte la tubería terciaria, y de ésta, los laterales.
- **Unión lateral - emisor.** Punto sobre el lateral, en el cual se inserta o acopla el emisor.

## 2.2 Emisores en el sistema de riego por goteo

### 2.2.1 Definiciones

- **Emisores.** Son los dispositivos que controlan la salida del agua, desde las tuberías laterales hasta la planta. Pueden estar en puntos discretos o ser continuos.
- **Punto de emisión.** Son los orificios de salida del agua procedente de los emisores. Cuando el mismo emisor dispone de varios puntos de emisión se denomina multisalida.
- **Goteros.** Son emisores con caudales no superiores a 16 L/h. En ellos se produce una disipación de energía que para caudales inferiores a 8 L/h es casi total, por lo que el agua sale gota a gota y para caudales mayores conserva parte de la energía saliendo el agua en forma de pequeños chorros. La diferencia fundamental entre los goteros (emisores) convencionales y los implantados en el RPBC es que en estos últimos, básicamente, la energía disponible es utilizada únicamente para conducir adecuadamente el agua hacia los puntos de emisión sin ser necesario disipar el exceso de energía.
- **Sistemas integrados.** Se trata de conducciones en las que, en el propio proceso de fabricación, se insertan interiormente goteros uniformemente espaciados (este procedimiento puede ser aplicado igualmente al RPBC), generalmente con caudales inferiores a 4 L/h por emisor.
- **Tuberías emisoras.** Son conducciones que a su vez aplican agua de riego mediante perforaciones poco espaciadas (generalmente menos de 0.50 m), pared porosa, etc. El caudal que descargan no sobrepasa los 16 L/h por metro lineal de conducción. La unidad de emisión es el tramo de tubería emisora, repetido a intervalos, desde el que fluye agua al exterior. Cuando se utilizan goteros o tuberías emisoras, el principal medio de propagación del agua es el suelo.
- **Difusores.** Son emisores por cuyo orificio de salida se lanza el agua al exterior con la suficiente presión para permitir su difusión a través del aire tras incidir el chorro en un deflector fijo.

- **Mini-aspersores.** Son aspersores de baja presión y caudal. El alcance es pequeño, normalmente no superior a los 3 m. Tanto los difusores como los mini-aspersores tienen caudales que no sobrepasan los 200 L/h. En este caso el aire es el principal medio de propagación del agua.

### 2.2.2 Requerimientos básicos

Las características fundamentales al seleccionar un emisor son:

- Caudal uniforme y constante, poco sensible a las variaciones de presión.
- Poca sensibilidad a las obturaciones.
- Elevada uniformidad de fabricación.
- Resistencia a la agresividad química y ambiental, así como a las operaciones agrícolas.
- Minimización de costos.
- Estabilidad de la relación caudal - presión a lo largo del tiempo.
- Poca sensibilidad a los cambios de temperatura.
- Reducida pérdida de carga en el sistema de conexión.
- Resistencia al ataque de insectos o roedores.

### 2.3 Pérdida de carga por conexión

Entre los diferentes tipos de emisores existentes, las conexiones de estos a las tuberías laterales pueden clasificarse en cuatro grandes grupos, como se describe en la Figura 2.2.

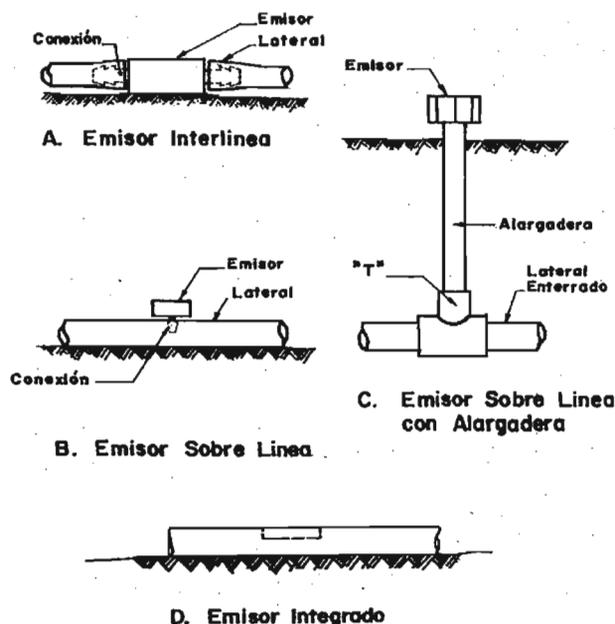


Figura 2.2. Distintas conexiones utilizadas en la interconexión entre tuberías laterales y emisores.

### 2.3.1 Tipos de conexiones

#### Conexión Interlínea

En ella el emisor conecta dos segmentos de la tubería lateral. Normalmente los emisores se consiguen de fábrica ya instalados a una distancia determinada en la tubería. La conexión suele ser en forma de diente de tiburón.

#### Conexión sobre línea

En este caso la tubería lateral es perforada mediante un punzón, introduciendo en el orificio producido la conexión del emisor (Figura 2.2. y Figura 2.3).

#### Conexión sobre línea con alargamiento

Variante del anterior, donde la perforación hecha en la tubería lateral, o bien con una T, se conecta un trozo de tubo que termina en el emisor.

#### Sistemas integrados

En ellos el emisor va insertado en el interior de la tubería lateral (Figura 2.3).

Todas estas conexiones producen una resistencia hidráulica en la tubería lateral que se traduce en una pérdida de carga que dependerá del tamaño y tipo de conexión así como del diámetro interior de la lateral y del caudal.

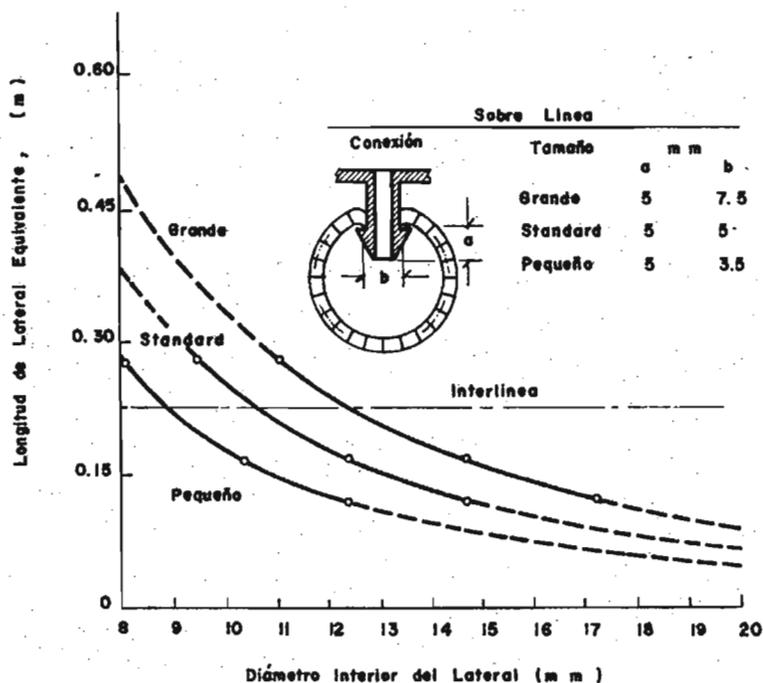


Figura 2.3. Longitudes equivalentes para el cálculo de pérdidas en emisores con conexión sobre línea.

## 2.4 Coeficiente de variación de fabricación

El coeficiente de variación de fabricación depende del diseño del emisor, de los materiales utilizados en su fabricación y del cuidado y tolerancia utilizados en el proceso y se cuantifica de la siguiente manera.

Se toma una muestra representativa de emisores del mismo tipo y se someten a idéntica presión, sin variar la temperatura del agua, el caudal de cada uno de ellos será distinto. Como sus caudales se distribuyen según la distribución normal ver Figura 2.4. Esta distribución estará, definida por su media y desviación estándar. Si se llama  $q_m$  a la media de todos los caudales medidos a la misma presión y temperatura y  $\sigma$  su desviación estándar, se puede definir el coeficiente de variación de fabricación CV como:

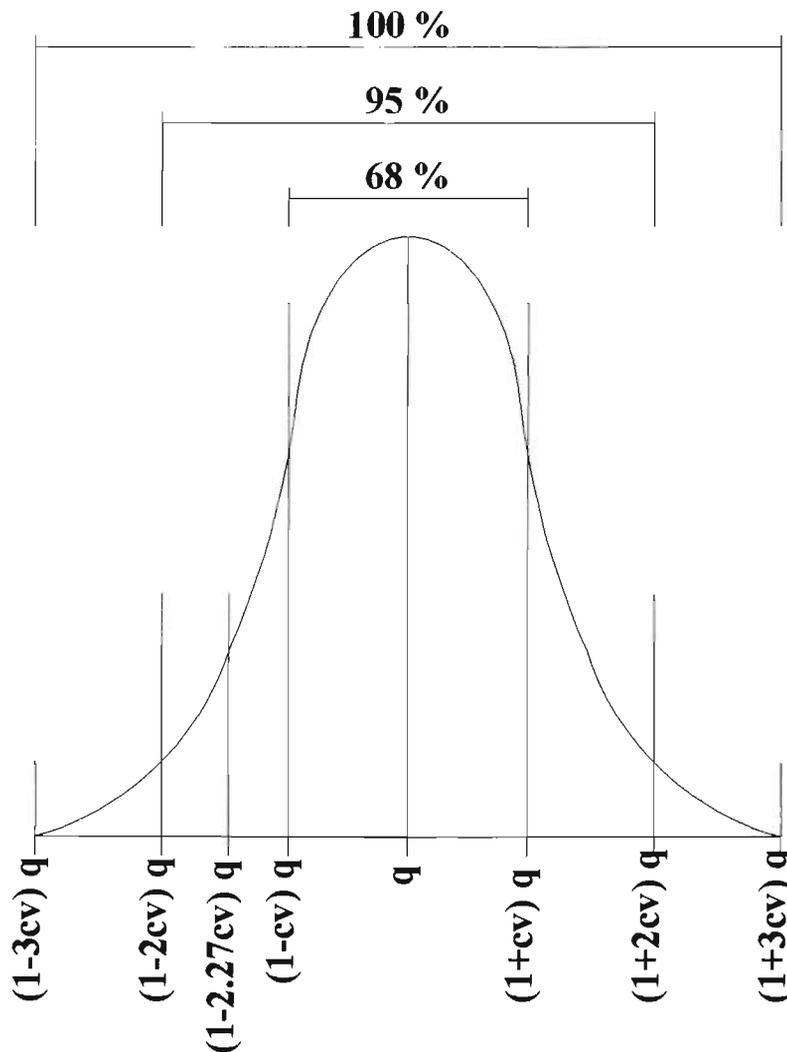


Figura 2.4. Distribución normal de caudales en emisores.

$$CV = \frac{s}{q_m} \quad (2.1)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum (q_i - q_m)^2}{n - 1}} \quad (2.2)$$

donde

- $q_i$  caudales experimentales.
- $q_m$  promedio de los caudales.
- $n$  número de ensayos.

La norma ASAE EP405-1 basada en la del US Soil Conservation Service clasifica los emisores de acuerdo con los valores de CV en:

Goteros, miniaspersores y difusores:

$CV \leq 0.05$	excelentes
$0.05 < CV \leq 0.07$	normales
$0.07 < CV \leq 0.11$	marginales
$0.11 < CV \leq 0.15$	deficientes
$0.15 < CV$	inaceptables

Tuberías emisoras de gotas:

$CV \leq 0.10$	buenas
$0.10 < CV \leq 0.20$	normales
$0.20 < CV$	deficientes a inaceptables

En las normas ISO la clasificación de los emisores se realiza únicamente en dos grupos: Categorías de uniformidad A y B de acuerdo con la Tabla 2.1.

Categoría de Uniformidad	Para la presión nominal desviación del caudal	Coefficiente de variación de fabricación, CV
A	< 5%	< 5%
B	< 10%	< 10%

Tabla 2.1. Clasificación de emisores según norma ISO.

El estándar americano refleja mucho mejor que las normas ISO la realidad del mercado (López, 1992), sobre todo en lo referente a las tuberías emisoras. Difícilmente pueden encontrarse comercializadas tuberías emisoras que tengan los parámetros anteriores inferiores al 10%. Lo normal es que los superen ampliamente, y es por ello que en el estándar ASAE se admiten valores de hasta el 20%.

En la práctica, el dato más importante es la diferencia de dosis de riego que reciben las plantas. Por tanto, en el caso que cada planta reciba el agua de más de un emisor, se define el coeficiente de variación del sistema CV, por:

$$CV_s = \frac{CV}{\sqrt{e}} \quad (2.3)$$

donde

- CV<sub>s</sub> coeficiente de variación de fabricación del sistema.
- CV coeficiente de variación de fabricación del emisor.
- e número de emisores que proporcionan agua a una planta.

Es importante señalar que en cultivos de alta densidad de plantación, aunque haya más plantas que emisores, debido al poco espaciamiento, cada planta puede recibir agua de dos o tres emisores y ésta es la cifra que deberá tomarse para (e).

Cuando se trata de goteros multisalida se debe tener en cuenta si se trata de un gotero con varios puntos de emisión o de varios goteros agrupados en un mismo punto. En este caso sigue siendo el número de goteros independiente de los puntos de emisión que tenga. Siempre debe aplicarse el mismo criterio que se utilizó al hacer la determinación de CV en laboratorio.

En el caso de difusores o miniaspersores, también se debe guardar un mínimo de uniformidad en su distribución espacial sobre el terreno, para evitar que se produzcan encharcamientos en determinadas zonas. Normalmente, no se admiten aquellos emisores en los que se producen fluctuaciones de en su distribución espacial de 1 a 2 entre puntos separados 1 m.

En general, puede decirse que el coeficiente de variación de fabricación es prácticamente independiente de la presión usada en la prueba, siempre que ésta esté comprendida en el entorno normal de uso del emisor. Frecuentemente los emisores que son desmontables tienen un alto coeficiente de variación de fabricación, así como los llamados autocompensantes. La influencia del CV en la variación de caudales en la subunidad de riego suele ser más importante que la variación de presiones debida a la pérdida de carga en las tuberías, incluso para valores realmente bajos de CV.

El CV definido se refiere a emisores recién fabricados, es decir, nuevos. Es muy importante conocer el CV de emisores usados, o bien su variación con el tiempo. Lógicamente éste se verá afectado por las obturaciones parciales o totales o envejecimiento de los materiales. Por ejemplo, con sólo un 5% de emisores totalmente obturados, el CV se incrementa de 0.05 a 0.24, si se usa uno por planta, i.e. e = 1.

## 2.5 Sensibilidad a las obturaciones

La sensibilidad del emisor a las obturaciones para una misma calidad de agua depende fundamentalmente del diámetro de su sección mínima de paso, de la velocidad del agua a través de esta sección y de la configuración o diseño de la misma. Según el diámetro de la sección mínima de paso, los goteros, tuberías emisoras y sistemas integrados pueden clasificarse en:

Muy sensibles a las obturaciones	$d < 0.7 \text{ mm.}$
Sensibles	$0.7 < d < 1.5 \text{ mm.}$
Poco sensibles	$d > 1.5 \text{ mm.}$

La presencia de zonas muertas en los conductos del agua dentro del emisor puede aumentar su sensibilidad a las obturaciones. El diseño debe prevenir no sólo las posibles obturaciones internas sino también las que pueden producirse de fuera cuando se corta el riego por efecto de la entrada de aire en la tubería lateral a través de los emisores. La velocidad dentro de los conductos del emisor tiene tanta importancia como el diámetro, ya que en emisores de largo conducto se pueden llegar a producir sedimentaciones. Velocidades mayores de 4.5 m/s reducen la posibilidad de obturaciones.

En general, se recomienda que el sistema de filtrado no deje pasar partículas sólidas, cuyo diámetro sea superior a 1/10 del diámetro de la sección mínima de paso en goteros. En el caso del RPBC dicha sección mínima es de 0.3175 mm esto hace que no se taponen.

En mini-aspersores y difusores esta norma puede rebajarse a 1/5, ya que la velocidad de paso por los conductos suele ser mayor y éstos mucho más cortos.

Para difusores y mini-aspersores se puede establecer la clasificación siguiente:

Muy sensibles a la obturación	$d < 0.4 \text{ mm.}$
Sensibles	$0.4 < d < 0.7 \text{ mm.}$
Poco sensibles	$d > 0.7 \text{ mm.}$

Las recomendaciones de filtrado del fabricante del emisor y la experiencia son la base, para determinar la sensibilidad a la obturación del emisor y, por consiguiente, sus requerimientos de filtrado.

Para el RPBC se tiene que los emisores tienen una dimensión mínima de 1/8" (3.175 mm) razón por la cual este sistema resulta ser poco sensible a las obturaciones.

## 2.6 Sensibilidad a la temperatura

La temperatura generalmente aumenta a lo largo de la lateral en casi todos los sistemas de riego por goteo con tuberías expuestas a la radiación solar. Es por ello necesario tener presente esta característica para el cálculo de estos sistemas.

Los resultados obtenidos de la descarga de varios tipos de emisores sometidos a distintas temperaturas, ha llevado a la fórmula

$$q = m + nT \quad (2.4)$$

donde

q caudal vertido por el emisor

m y n son constantes determinadas al realizar el ajuste de los datos (ver Tabla 2.2).

T temperatura del agua en °C.

La sensibilidad a la temperatura, expresada por n, depende fundamentalmente de la intensidad de la turbulencia del flujo dentro del emisor. Cuanto mayor sea éste, menor será la dependencia del caudal con la viscosidad.

Presión en kPa	n	m	Coefficiente de correlación (R <sup>2</sup> )
(a) Helicoidal 2 L/h			
100	0.0169	1.6872	0.9946
200	0.0254	2.8927	0.9964
300	0.0303	3.9242	0.9878
(b) Helicoidal 4 L/h			
100	0.0323	3.0612	0.9948
200	0.0470	5.1131	0.9964
300	0.0651	6.7083	0.9898
(c) Laberíntico 4 L/h			
100	0.0079	4.8769	0.9040
200	0.0092	7.3293	0.8574
300	0.0139	9.1871	0.8594
(d) Vortex 7.5 L/h			
100	0.0180	7.2695	0.9913
200	0.0222	9.8105	0.9740
300	0.0213	11.6188	0.9817

Tabla 2.2. Valores experimentales de las constantes m y n para varios tipos de emisores, adaptada de Zur y Tal.

El diseño de la geometría y el tipo de material utilizado, debe tener en cuenta la influencia de la temperatura, ya que esta influye en las características de los materiales elásticos que, a veces, forman parte del emisor, pero sobre todo produce dilataciones variando las dimensiones de los conductos.

A pesar de la escasa información con la que se cuenta, puede decirse, en el ámbito general, que la sensibilidad a la temperatura es grande en los emisores de largo conducto, aumentando con la presión interior y su sección de paso de agua, mientras que los emisores de tipo laberinto son poco sensibles a la temperatura y, por último, en los emisores tipo vortex la descarga decrece cuando aumenta la temperatura. Cuando las tuberías laterales se

entierran (o están en la sombra), las variaciones de temperatura disminuyen substancialmente.

Para estimar la variación del factor de fricción en el diseño de los sistemas de irrigación, debe considerarse el cambio en la viscosidad con la temperatura, debido a que dicho cambio puede afectar significativamente la estimación de las pérdidas de energía. En particular, un estudio experimental requiere verificar esta variación, para un determinado diámetro y descarga.

En un estudio experimental para estudiar la ley de resistencia en tuberías de polietileno (PE) de diámetros pequeños, que fue llevado a cabo en la Universidad de Palermo, Italia, por Bargarello en 1995 y 1997. Se encontró que las tuberías variaban de diámetro con la temperatura de acuerdo a la ecuación 2.5.

$$D = b_0 + b_1 T \quad (2.5)$$

donde

$b_0$  y  $b_1$  se reportan en la Tabla 2.5.

$T$  es la temperatura a la cual se opera el sistema.

Diámetro (mm)	$b_0$ (mm)	$B_1$ (mm °C <sup>-1</sup> )
16	13.55	$5.18 \times 10^{-3}$
20	16.82	$5.70 \times 10^{-3}$
25	20.36	$6.21 \times 10^{-3}$

Tabla 2.5. Coeficientes  $b_0$  y  $b_1$  de la ecuación de ajuste obtenida.

Y que el comportamiento del coeficiente de fricción en tuberías de polietileno, sigue una ley parecida a la de Blasius dada por

$$f = \frac{0.316}{R^{0.25}} \quad (2.6)$$

que se transforma en

$$f = \frac{0.325}{R^{0.25}} \quad (2.7)$$

Por lo anterior resulta conveniente utilizar la ecuación 2.7 en diseño de la red de laterales, cuando se asuma que la tubería se comporta como hidráulicamente lisa.

Estos resultados se confrontaran con los encontrados en el presente trabajo que se presentan en los capítulos siguientes.



### 3. CONSIDERACIONES TEÓRICAS

#### 3.1 Definición del sistema

En la Figura 3.1 se muestra el sistema con sus variables principales. Las mediciones se hicieron tomando en cuenta la caída de la presión a lo largo de la línea lateral para tres gastos distintos por el emisor  $q_i$  y se comparo con los valores calculados de la ecuación de conservación de energía y los coeficientes de pérdidas apropiados.

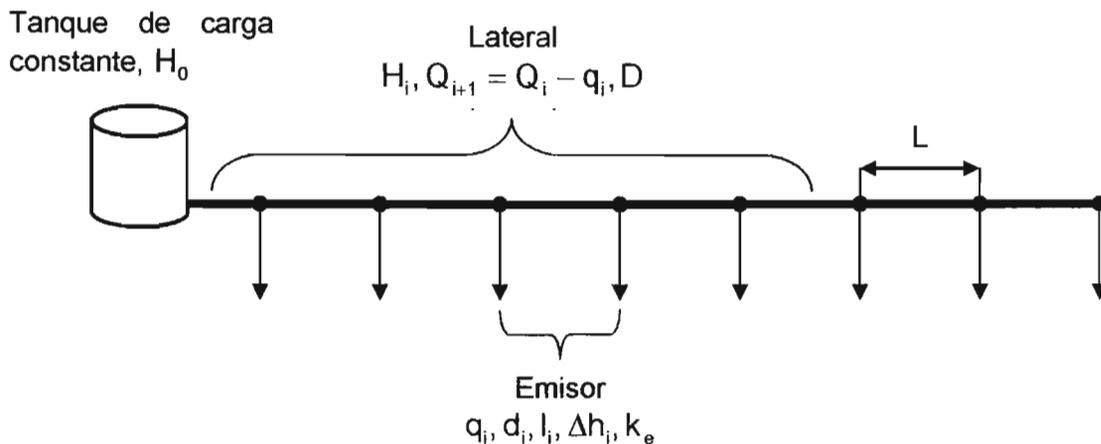


Figura 3.1. Modelo conceptual de la línea lateral.

#### 3.2 Hidráulica del lateral

El flujo en una tubería lateral es espacialmente variado y las pérdidas de carga entre una sección y la siguiente se puede calcular con la ecuación de la conservación de energía dada por

$$H_i - H_{i+1} = (z_{i+1} - z_i) + \left( \frac{V_{i+1}^2 - V_i^2}{2g} \right) + H_{f_{i+1}} + \left( \frac{V_{i+1}^2 - V_i^2}{g} \right) + \zeta_i \frac{V_i^2}{2g} \quad (3.1)$$

donde

$H_i - H_{i+1}$ , es la diferencia de carga del punto  $i$  al punto  $i+1$ ;

$(z_{i+1} - z_i) = 0$ , para terreno nivelado;

$\left( \frac{V_{i+1}^2 - V_i^2}{2g} \right)$ , es la diferencia de carga de velocidad del punto  $i$  al punto  $i+1$ ;

$$H_{f_{i+1}} = f_i \left( \frac{L}{D} \right) \frac{V_{i+1}^2}{2g} \quad (3.2)$$

es la fórmula de fricción de Darcy-Weisbach con  $f_i$  dado por

$$f_i = \frac{64}{Re_i} \quad \text{para} \quad Re_i \leq 2000 \quad (3.3)$$

$$f_i = \frac{0.325}{Re_i^{0.25}} \quad \text{para} \quad Re_i > 2000 \quad (3.4)$$

Las fórmulas (3.3) y (3.4) son las ecuaciones de Hagen-Poiseuille y Blasius modificada respectivamente, y el número de Reynolds dado por  $Re_i = \frac{V_i D_i}{\nu}$ ,  $L$  es la separación entre emisores y  $D_i$  es el diámetro de la tubería lateral.

$\left( \frac{V_{i+1}^2 - V_i^2}{g} \right)$ , es la variación de la carga piezométrica por el cambio de velocidad, es decir el cambio de momentum.

El último término de la ecuación (3.1)

$$\zeta_i = \tau \frac{q_i}{Q_i} \quad (3.5)$$

$d_i^2 / D_i^2$	$\leq 0.4$
$q_i / Q_i$	$0 - 1.0$
$\tau$	$0.4$

son las pérdidas locales debido al flujo divergiendo de la lateral a cada emisor dado por Idelchick (Idelchick, 1994). Donde  $q_i$  es el gasto del emisor,  $Q_i$  es el gasto por el lateral,  $d_i$  es el diámetro del emisor y  $\tau$  es un coeficiente de corrección.

### 3.3 Hidráulica del emisor

El comportamiento hidráulico de los emisores requiere tomar en cuenta las ecuaciones de Hagen-Poiseuille y de Blasius, así como el coeficiente de fricción  $f_i$  la longitud de transición, coeficiente de Coriolis y un coeficiente de pérdidas por entrada  $k_e$ , que se verán a continuación.

#### 3.3.1 Ecuación de Hagen-Poiseuille

La ley de pérdida de energía para un flujo laminar a través de un tubo recto de sección transversal circular con diámetro constante  $D = 2r$ , que se muestra en la Figura 3.2 se obtiene observando que la condición de equilibrio en la dirección del eje "x" requiere que

la fuerza de presión  $(p_1 - p_2)\pi r^2$  que actúa en las caras del cilindro sea igual al cortante  $2\pi r l \tau$  actuando en el área circunferencial.

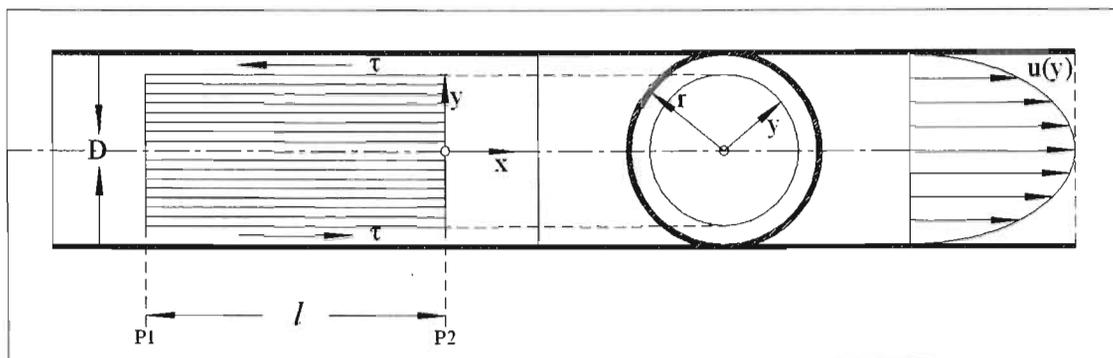


Figura 3.2. Flujo laminar a través de un tubo.

O sea

$$\tau = \frac{p_1 - p_2}{l} \frac{r}{2} \quad (3.6)$$

Como  $\tau = -\mu \frac{du}{dr}$ , de la ecuación (3.6) se llega a

$$\frac{du}{dr} = -\frac{p_1 - p_2}{\mu l} \frac{r}{2} \quad (3.7)$$

Nótese que las componentes de la velocidad en las direcciones tangenciales y radiales son cero; la componente de velocidad paralela al eje, denotada por  $u$ , depende de  $y$  únicamente, y la presión es constante en cada sección transversal.

Otra forma de obtener la ecuación anterior es a través de las ecuaciones de Navier-Stokes en coordenadas cilíndricas,

$$\mu \left( \frac{d^2 u}{dy^2} + \frac{1}{y} \frac{du}{dy} \right) = \frac{dp}{dx} \quad (3.8)$$

con las condiciones de frontera:  $u = 0$  para  $y = R$ .

La solución de la ecuación anterior da la distribución de velocidades

$$u(y) = -\frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dx} (R^2 - y^2) \quad (3.9)$$

donde  $-\frac{dp}{dx} = \frac{(p_1 - p_2)}{l} = C$ , es el gradiente de presión.

La velocidad en cada sección transversal tiene la forma de un paraboloides de revolución, con el máximo en el eje dado por

$$u_m = \frac{R^2}{4\mu} \left( -\frac{dp}{dx} \right) \quad (3.10)$$

El flujo laminar descrito por la solución anterior sólo ocurre en la práctica si el número de Reynolds tiene un valor menor que un número de Reynolds crítico.

La relación entre el gradiente de presión y la velocidad media del flujo se representa introduciendo un coeficiente de pérdidas,  $f$ . Este coeficiente se define igualando al gradiente de presión con la carga dinámica al cuadrado de la velocidad media del flujo, según la ecuación

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{f}{d} \frac{\rho}{2} \bar{u}^2 \quad (3.11)$$

Introduciendo la expresión para  $\frac{dp}{dx}$  de la ecuación anterior se obtiene

$$f = \frac{2d}{\rho \bar{u}^2} \frac{8\mu \bar{u}}{R^2} = \frac{32\mu}{\rho \bar{u} R} \quad (3.12)$$

eso es

$$f = \frac{64}{R} \quad (3.13)$$

Aquí  $R$  denota el número de Reynolds calculado con el diámetro del tubo y la velocidad promedio de flujo. La ecuación para la pérdida de presión en la tubería, está de acuerdo con los resultados experimentales para el flujo laminar, como se ve en la Figura 3.3 que reproduce puntos experimentales medidos por G. Hagen.

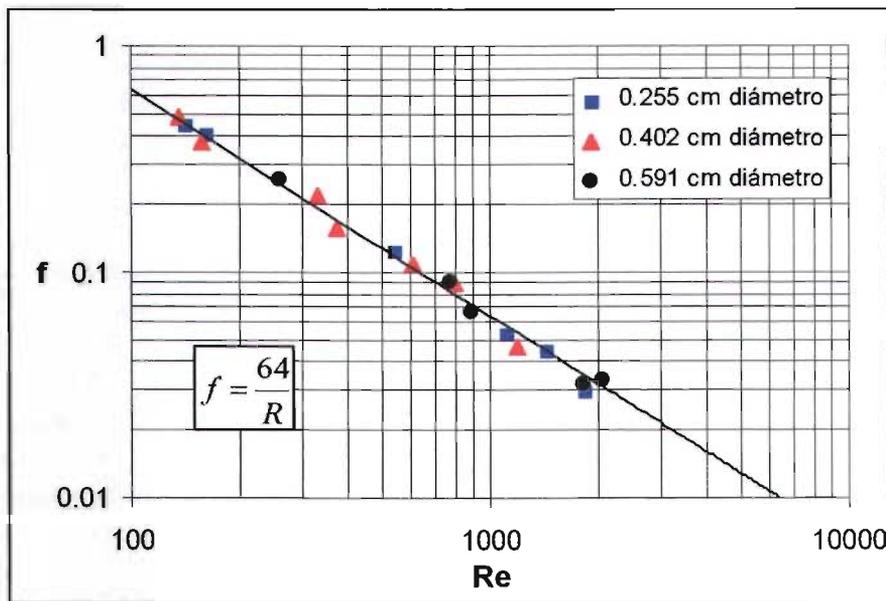


Figura 3.3. Flujo laminar a través de un tubo; coeficiente de resistencia  $f$  contra número de Reynolds.

### 3.3.2 Longitud de transición

La longitud de transición o de entrada es la distancia  $l_e$  que necesita el flujo para adquirir una distribución de velocidad que no cambie de sección a sección a partir del inicio del tubo, para el caso de flujo laminar, la longitud de entrada debida a Boussinesq está dada por

$$\frac{l_e}{d_i} = 0.065 Re \quad (3.14)$$

donde  $Re$  es el número de Reynolds y  $d_i$  es el diámetro del tubo. Así, para  $R = 2,000$ ,  $l_e$  es 130 diámetros. Experimentalmente,  $l_e$  está en un rango de 50 a 10 veces el diámetro.

En la longitud de la entrada, el cortante en las paredes del tubo varía según la distancia de la esquina del tubo. El cortante en una sección de tubo depende de  $R_x = V_x d/v$  en donde  $x$  es la distancia entre la esquina de entrada y la sección medida a lo largo del tubo, ver Figura 3.4. Para números de Reynolds pequeños y moderados, para encontrar un valor teórico para el cortante en la pared o un coeficiente de fricción  $f$  relacionado, se tendrán dificultades matemáticas, tomando en cuenta todos los términos de la ecuación de Navier-Stokes deben ser considerados (Daily & Harleman, 1966 y Panton, 1996).

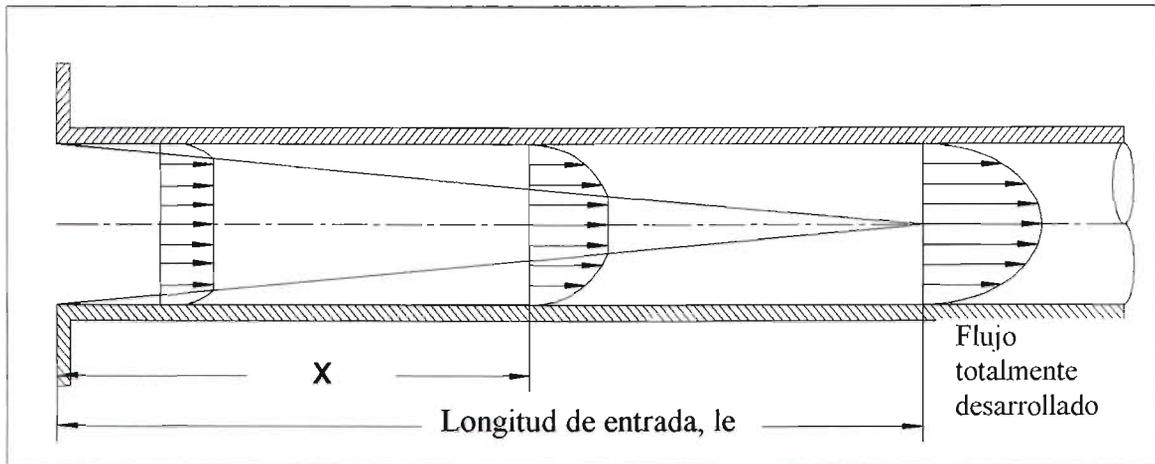


Figura 3.4. Flujo que entra en un tubo del diámetro pequeño.

### 3.3.3 Coeficiente de Coriolis

Es un coeficiente de corrección de la carga de velocidad y esta dado por la ecuación

$$\alpha = \frac{1}{A} \int \frac{v^3}{V^3} dA \quad (3.15)$$

donde

$v$ , es la velocidad máxima para flujo laminar dada por  $v_{\max} = -\frac{d(p + \gamma h)}{dz} \frac{r_0^2}{4\mu}$ ;

$V$ , es la velocidad media para flujo laminar dada por  $V = -\frac{d(p + \gamma h)}{dz} \frac{r_0^2}{8\mu}$ .

Resolviendo la integral se encuentra que el coeficiente de Coriolis vale 2, que es cuando el flujo esta totalmente desarrollado, que es el valor máximo que se tiene, y un valor mínimo de 1, para flujo con un valor constante en toda la sección. Para un rango intermedio entre esos valores se utilizará, en este trabajo, la siguiente ecuación  $\alpha = 1 + (l_i/l_e)$ .

### 3.3.4 Coeficiente de pérdida por entrada

En este estudio se evaluó un coeficiente de pérdida de entrada,  $k_e$  similar al usado para flujo turbulento igual a 0.5 para entradas en esquina. Debe notarse que este  $k_e$  incluye la influencia de tres efectos: las pérdidas antes de la entrada, las pérdidas asociadas a las esquinas de la entrada, y diferencias entre la solución teórica y el flujo real.

Para un emisor con un diámetro interior  $d_i$  y longitud  $l_i$ , la ecuación de conservación de energía es

$$\Delta h_i = k_e \frac{v^2}{2g} + f \frac{l_i}{d_i} \frac{v^2}{2g} + \alpha \frac{v^2}{2g} \quad \text{para } l_i < l_e \quad (3.16)$$

$$\Delta h_i = k_e \frac{v^2}{2g} + f \frac{l_i}{d_i} \frac{v^2}{2g} + 2 \frac{v^2}{2g} \quad \text{para } l_i > l_e \quad (3.17)$$

En la cual  $\Delta h_i$  es la diferencia de carga entre un punto justo antes de la entrada del emisor y el final del emisor;  $f$  = es el coeficiente de pérdidas distribuidas dado por las ecuaciones (3.3) y (3.4);  $x$  = distancia de la esquina de la entrada ( $x < l_e$ );  $l_e$  = longitud de entrada;  $v$  = velocidad media; y  $\alpha$ , es el coeficiente Coriolis.

Como el coeficiente de pérdida por entrada  $k_e$  del emisor, es una función desconocida del número de Reynolds y de la relación  $l_i/d_i$  para números de Reynolds pequeños y moderados, fue necesario encontrarlo experimentalmente.

### 3.3.5 Tensión superficial

La atracción capilar se origina por la acción combinada de la tensión superficial y el valor relativo de fuerzas de adhesión entre líquido y sólido y fuerzas de cohesión en el líquido. Para un líquido que moja la pared de un sólido, la adhesión es mayor que la cohesión. En este caso, la tensión superficial ocasiona que el líquido suba a través de cualquier tubo vertical de diámetro pequeño que se encuentre parcialmente sumergido en el líquido. En el caso de líquidos que no mojan al sólido, la tensión superficial tiende a abatir el menisco en un pequeño tubo vertical. Por lo anterior, se realizó una prueba para ver si se consideraba el efecto de tensión superficial, el cual se explica en el siguiente capítulo.



## 4. EQUIPO EXPERIMENTAL Y MEDICIONES

Para estudiar el comportamiento hidráulico del sistema se utilizaron dos instalaciones experimentales. En la primera se encontraron y corroboraron los coeficientes de pérdidas para laterales y en la segunda se estudio el flujo en los emisores.

A continuación se describirá cada una de ellas, así como el procedimiento experimental seguido en cada una.

### 4.1 Instalación para estudiar las pérdidas en la lateral

Se construyó una línea lateral de 1.67 cm de diámetro ( $\frac{1}{2}$ " nominal) y 50 m de longitud. Esta línea está conectada a un control de carga constante por medio de una educción de 4" a  $\frac{1}{2}$ " y 50 emisores a cada metro, así como 7 tubos piezométricos para medir la carga en 7 puntos de la línea lateral. Toda la instalación era alimentada por una manguera conectada a la red de agua potable.

Para poder variar la carga se utilizaron 50 soportes desmontables, que consistían de una base de concreto con una ranura, donde se introducía un perfil angular "L" de 1", de 1.2 m de altura. En ellos se colocaron escalas previamente niveladas, con su origen a igual altura que el agua en el vertedor circular del controlador de carga constante.

Los emisores, seleccionados de acuerdo con los resultados de las pruebas en el laboratorio, fueron mangueras de plástico de  $\frac{1}{8}$ " de diámetro interior y 1.5 m de longitud y con una conexión con la lateral, sin entrantes, o sea a ras con la superficie interior de ella, para reducir lo más posible las pérdidas por conexión.

Para medir los pequeños gastos en los emisores se utilizaron probetas graduadas de 100 y 1000 ml de capacidad, dos cronómetros y un termómetro.

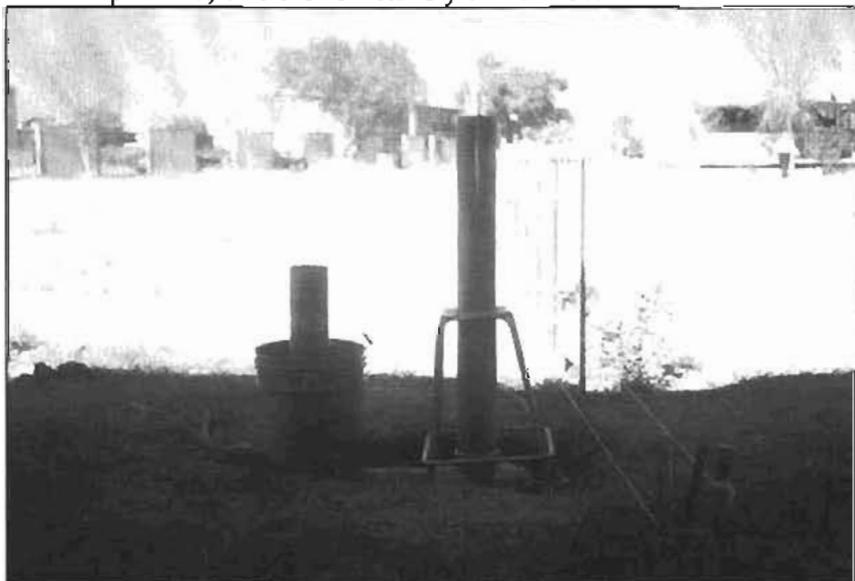


Figura 4.1. Instalación para estudiar las pérdidas en la tubería lateral.

## 4.2 Instalación y pruebas en los emisores

Para estudiar el comportamiento hidráulico de los emisores (goteros) y realizar una serie de pruebas que más adelante se discutirán en detalle, se construyó una instalación de laboratorio, la cual se compone de 10 elementos que se describen a continuación.

### 4.2.1 Vertedor Circular

Consiste en un tubo de PVC de 4" (Figura 4.2 y Figura 4.3) de diámetro, dispuesto de forma vertical, el cual va adosado a un codo de igual material, hace las veces de un vertedor circular, tiene como objetivo primordial proveer de carga constante a la unidad experimental.

### 4.2.2 Recipiente Colector

Recipiente cilíndrico mostrado en Figura 4.2, Figura 4.3 y Fotografía 4.1, tiene como función principal recolectar el agua en exceso que desborda por el vertedor circular y conducirlo a través de una manguera hacia la toma de la bomba.

### 4.2.3 Tubo horizontal de carga

A la terminación horizontal del codo de 90° mostrado en Figura 4.2, Figura 4.3 y Figura 4.4, se le adhiere un tubo de 4" de diámetro que sirve de tramo de carga de la tubería de 3/4" de diámetro.

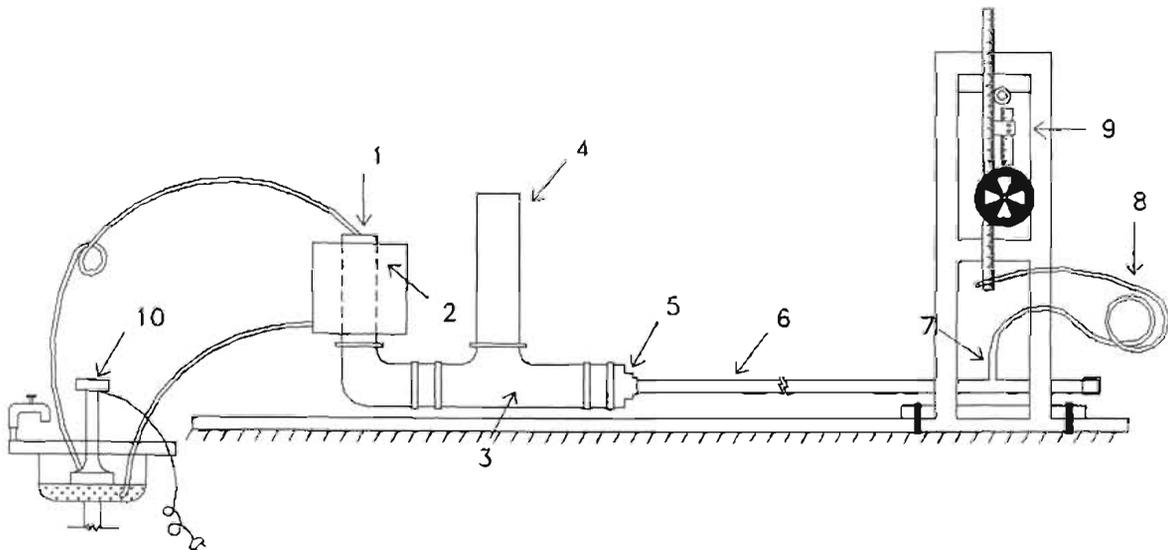


Figura 4.2. Instalación experimental en el laboratorio que sirvió de unidad experimental para las pruebas de los emisores.

#### 4.2.4 Dispositivo de regulación

Mediante un tubo colocado en posición vertical aguas abajo del vertedor circular, se realiza la expulsión de pequeñas burbujas de aire que se pudiesen formar en el dispositivo de carga constante, la disposición de este componente se muestra en Figura 4.2, Figura 4.3 y Fotografía 4.1.

#### 4.2.5 Transición

Mediante una reducción se pasa del tubo regulador de burbujas de 4", a la tubería de prueba, que en este caso es el llamado tubo lateral del RPBC de  $\frac{3}{4}$ ", para más detalles ver Figura 4.2 y Figura 4.3.

#### 4.2.6 Lateral de prueba

Tubería de  $\frac{3}{4}$ " en PVC de 1 m de longitud, a la cual se le ha practicado un pequeño agujero, sirve para ensayar los distintos emisores con diferentes diámetros. Se complementa esta descripción con la Figura 4.3 y Figura 4.4.

#### 4.2.7 Unión lateral – emisor

Con arreglo de mangueras de pequeño diámetro, con el objeto de determinar los coeficientes de pérdidas locales de este componente, la forma y disposición de la unión lateral emisor se muestran en Figura 4.2 y Figura 4.4.

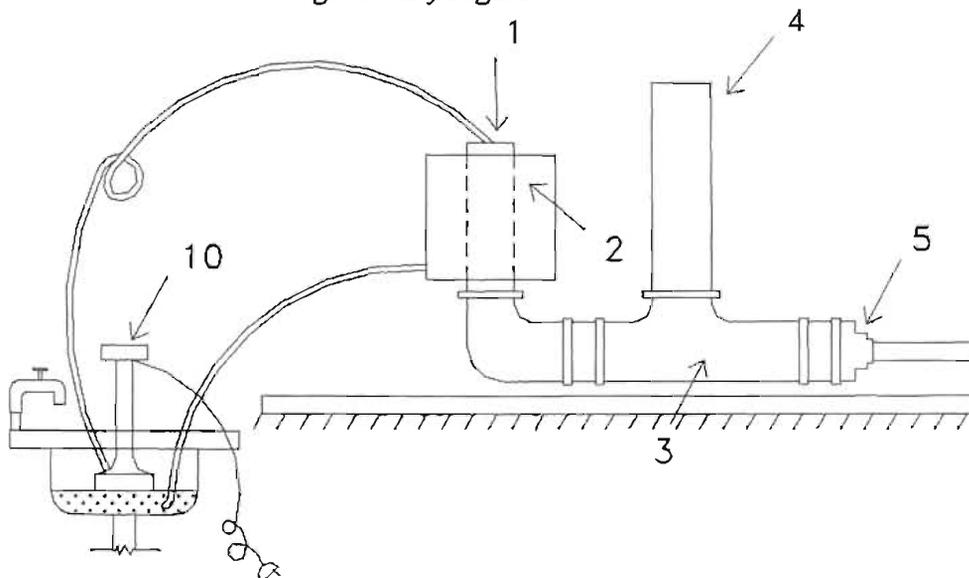


Figura 4.3. Acercamiento y detalles de algunos de los componentes de la unidad experimental.

#### 4.2.8 Emisor

En el sistema RPBC se utilizan mangueras de pequeño diámetro como emisor, éste tiene conectado su extremo de aguas abajo a la unión lateral emisor y el extremo de aguas arriba a la regla graduada de un limnómetro, para mayor detalle de esta disposición ver Figura 4.2 y Figura 4.4.

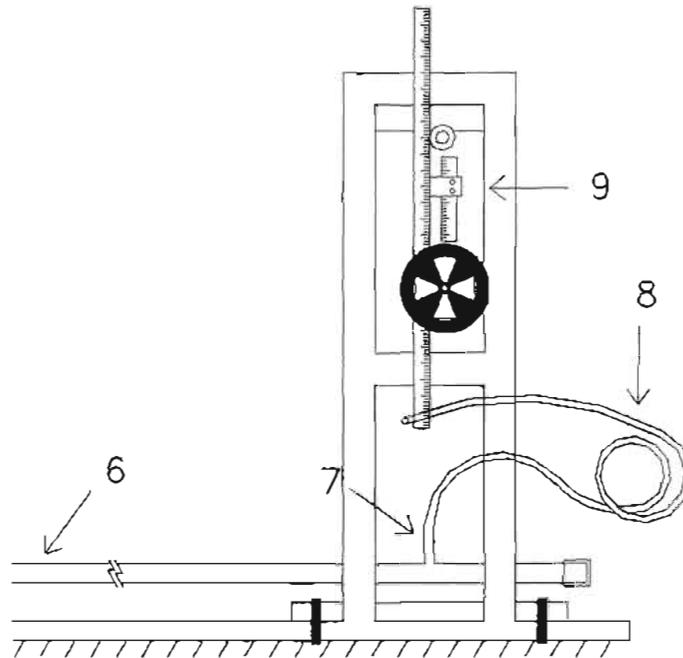
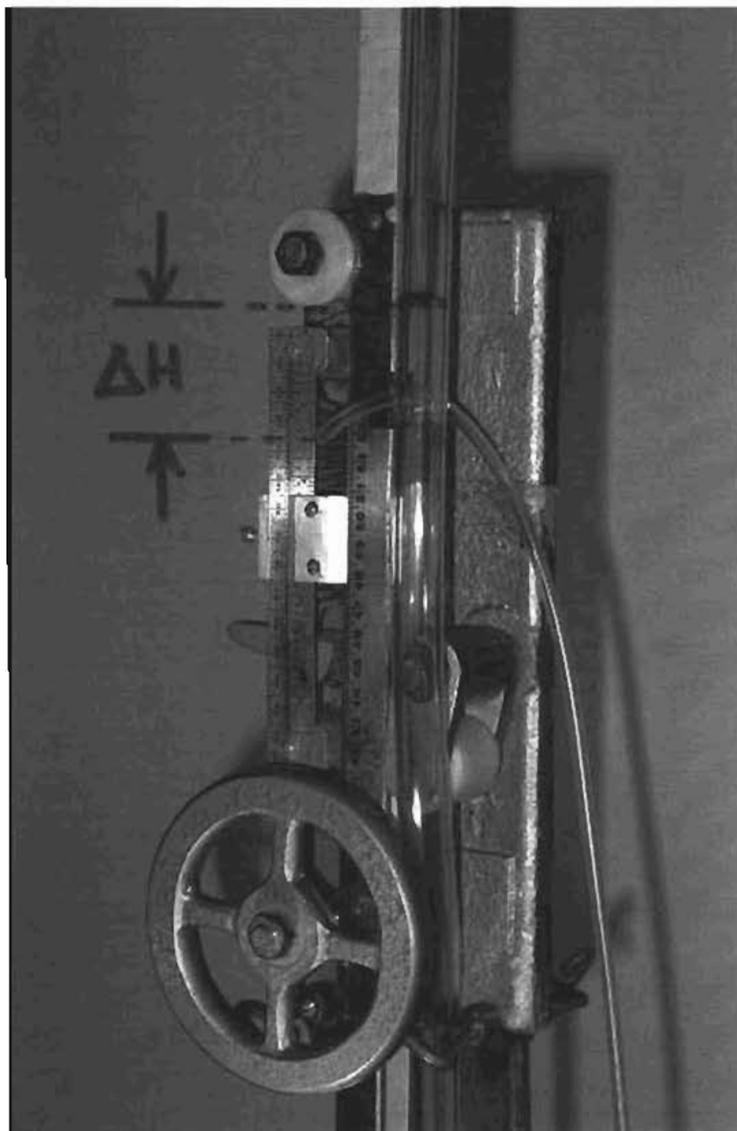


Figura 4.4. Arreglo del emisor y limnómetro en la unidad experimental.

#### 4.2.9 Limnómetro graduado

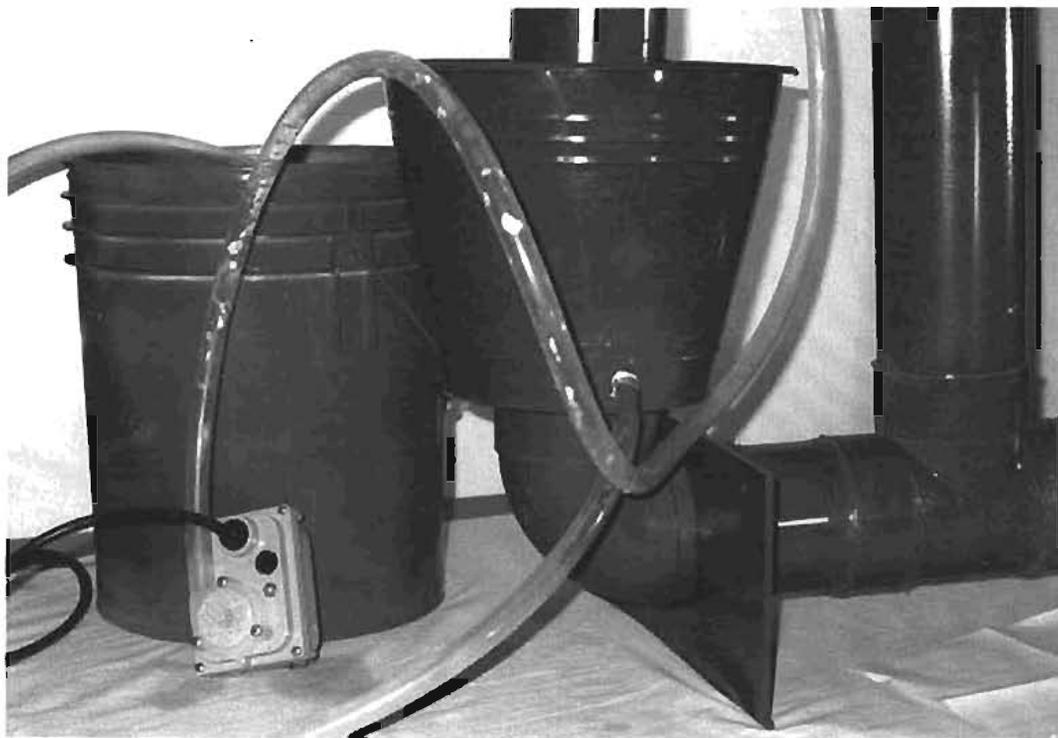
La unidad experimental está dotada de un limnómetro, como el mostrado en la Fotografía 4.2, el cual sirve para medir las cargas ( $\Delta h_i$ ) a las que se somete el emisor. Y el ascenso o descenso, produce variaciones en el caudal vertido, de este modo se obtienen los distintos caudales de prueba. Detalles de la localización de este componente se pueden ver en detalle en la Figura 4.2, Figura 4.4 y Fotografía 4.1.



Fotografía 4.1. Arreglo de emisor y limnómetro utilizado durante las pruebas en el laboratorio.

#### 4.2.10 Sistema de recirculación de agua

Mediante un pequeño cárcamo o tanque, en el cual se encuentra una bomba modelo 283-2F-288/1 de 1/100 HP de potencia (que posteriormente fue reemplazada por una bomba sumergible 1-MA de 1/200 HP y 170 GPH a una altura de 1 pie), se forma un sistema cerrado de recirculación de agua, que fue implementado con el objeto de no desperdiciar agua en la prueba. La ubicación de este dentro de la unidad experimental se muestra en la Figura 4.2, Figura 4.3 y Fotografía 4.2.



Fotografía 4.2. Arreglo de mangueras en el sistema de recirculación de agua.

## 4.3 Mediciones

Los emisores, seleccionados de acuerdo con los resultados de las pruebas en el laboratorio y que se reporta más adelante, fueron mangueras de plástico de los siguientes diámetros 1.27, 2.22, 3.75 y 4.76 mm con una longitud de 0.02, 0.75, 1.50, 3.00 m en una conexión a la lateral a ras con la superficie de ella sin entrantes, para reducir lo más posible los cambios de dirección en el flujo y en la trayectoria de las líneas de corriente dentro del lateral y un rango de números de Reynolds entre 30 y 900. Para medir los pequeños gastos en los emisores se utilizaron probetas graduadas de 100 y 1000 ml de capacidad y un cronómetro. Simultáneamente a la realización de las pruebas se realizaron mediciones de la temperatura del agua, tanto en el dispositivo de control de carga, como en las probetas. No se detectó una diferencia significativa entre ambas lecturas que pudieran alterar los resultados obtenidos.

### 4.3.1 Estimación de la uniformidad de riego

La uniformidad de riego en una instalación depende básicamente de los siguientes factores:

- Diferencias de presión que se producen en la red, debidas a las pérdidas de carga y a la variación de la topografía del terreno donde se instala.
- Falta de uniformidad de fabricación de los emisores.
- Respuesta del emisor a las variaciones de temperatura y presión del agua.
- Variación de las características del emisor con su uso, debido a las posibles obturaciones o envejecimiento.
- Variaciones espaciales y temporales de la temperatura del agua.
- Variación del funcionamiento o fabricación de los dispositivos de control de carga constante.

El grado en que cada uno de estos factores puede afectar la uniformidad de riego ha sido establecido por Solomon (1985), en orden de mayor a menor importancia en:

1. Obturaciones.
2. Número de emisores de los que recibe agua cada planta.
3. coeficiente de variación de fabricación del emisor.
4. Exponente de descarga del emisor.
5. Sensibilidad del emisor a los cambios de temperatura.
6. Variaciones de presión.
7. Coeficiente de fabricación de los reguladores de carga.
8. Funcionamiento de la red de riego en general.

Este orden no es absoluto, y depende del rango de los valores asociados a cada uno de los parámetros, pero es, en general, aplicable para valores medios (condiciones normales).

La uniformidad aumenta cuando se incrementa el número de emisores instalados y su sensibilidad a la temperatura. También se incrementa, cuando disminuyen los factores restantes listados anteriormente.

Un coeficiente de uniformidad de riego adoptado por el Soil Conservation Service (USC) y también por la American Society of Agricultural Engineers (ASAE), fue propuesto por Christiansen (Merriam y Keller, 1978), y se calcula con la siguiente ecuación:

$$UCC = 1 - \frac{1}{nQ_d} \sum_1^n |Q_i - Q_d| \quad (4.1)$$

donde

$|Q_i - Q_d|$  valor absoluto de las desviaciones con relación al caudal de diseño.  
 $Q_d$  caudal de diseño de los emisores.  
 $n$  número de emisores aforados.

El grado de aceptabilidad de un sistema de riego por goteo se puede clasificar, como excelente si  $0.95 \leq UCC \leq 1$ , bueno si  $0.85 \leq UCC \leq 0.95$ , normal  $0.75 \leq UCC \leq 0.85$ , malo si  $0.65 \leq UCC \leq 0.75$  e inaceptable para valores de UCC inferiores a 0.65.

#### 4.4. Instalación para el estudio de los emisores

##### 4.4.1 Mediciones en la instalación de laboratorio

En las Figura 4.5 se muestran las geometrías utilizadas en donde la unión con el lateral se hace a ras, por medio de los diferentes diámetros ensayados (1.27, 2.22, 3.75, 4.76 mm).

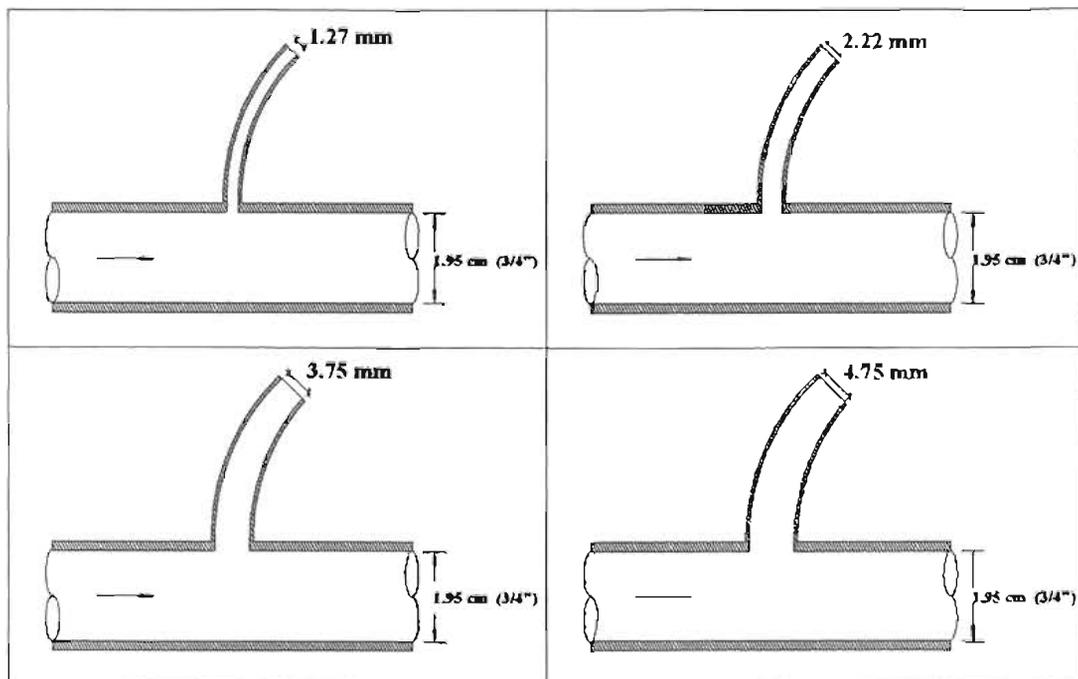


Figura 4.5. Geometrías utilizadas en la unión lateral con emisor.

#### 4.4.2 Pruebas efectuadas

Los ensayos se realizaron en la instalación experimental descrita anteriormente. Cada ensayo se hacía de la manera siguiente: Se llenaba el cárcamo pequeño, posteriormente se encendía la bomba, para presurizar el sistema, hasta que empezaba a derramar el vertedor circular. Una vez estabilizado el flujo y purgadas las tuberías, se tomaba la temperatura del agua y se iniciaban las mediciones captando el volumen de agua, que goteaba por el emisor, en un vaso graduado durante un tiempo de 3 minutos y para una cierta altura o carga, medida desde el nivel del agua en el vertedor (hacia abajo) hasta el centro de la boca de salida del tubo emisor, realizándose un mínimo de 3 veces de cada una de las pruebas para tener la seguridad de que no existía algún cambio considerable, bajo las mismas condiciones.

Las diferentes cargas se seleccionaban en forma aleatoria, para evitar tendencias o errores acumulados, y los ensayos se hicieron dentro de un rango de gastos de 1 a 10 l/h por emisor. Una vez terminadas las mediciones se volvía a tomar la temperatura del agua, se apagaba la bomba y se drenaba la instalación experimental.

Dado que, como se mencionó anteriormente, la entrada a ras con la superficie interior de la línea lateral, se consideró la más práctica; en todos los ensayos hechos a continuación se usó esta geometría de entrada y solo se varió el diámetro y longitud de los emisores, así como la temperatura del agua.

En las tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 se reportan los datos medidos en los ensayos que fueron los siguientes, la carga  $\Delta h_i$  en mm, el volumen del líquido en (ml) para un tiempo de prueba de 3 minutos, la temperatura en  $^{\circ}\text{C}$  y la longitud del emisor. Con estos datos medidos se calculó el gasto  $q_i$  por el emisor en (L/h), la velocidad en (m/s) y el número de Reynolds

Tabla 4.1

Diámetro del emisor = 1.27 mm

Tiempo de prueba: 3 minutos

$\Delta h$ (mm)	Volumen (ml)	Temperatura (°C)	Longitud del emisor (m)	Q (l/h)	V (m/s)	Re
15.0	5.9	25	0.02	0.118	0.026	36.5
15.0	5.5	25	0.02	0.110	0.024	34.0
15.0	5.4	25	0.02	0.108	0.024	33.4
17.0	11.4	22	0.02	0.228	0.050	66.8
18.1	8.9	22	0.02	0.178	0.039	52.2
18.6	15.0	22	0.02	0.300	0.066	87.9
19.0	17.5	22	0.02	0.350	0.077	102.6
21.0	18.5	22	0.02	0.370	0.081	108.5
21.0	19.0	22	0.02	0.380	0.083	111.4
21.0	24.5	23	0.02	0.490	0.107	146.7
21.0	24.0	23	0.02	0.480	0.105	143.7
21.0	24.0	23	0.02	0.480	0.105	143.7
21.2	17.5	24	0.02	0.350	0.077	106.5
21.2	18.0	24	0.02	0.360	0.079	109.6
32.0	44.0	22	0.02	0.880	0.193	258.0
32.0	45.0	22	0.02	0.900	0.197	263.8
35.0	69.0	25	0.02	1.380	0.303	427.0
35.0	70.0	25	0.02	1.400	0.307	433.2
36.0	68.5	25	0.02	1.370	0.300	423.9
39.0	60.0	23	0.02	1.200	0.263	359.3
49.5	83.0	22	0.02	1.660	0.364	486.6
49.5	84.0	22	0.02	1.680	0.368	492.5
49.5	83.0	22	0.02	1.660	0.364	486.6
50.5	91.0	23	0.02	1.820	0.399	545.0
50.5	90.0	23	0.02	1.800	0.395	539.0
50.5	90.0	23	0.02	1.800	0.395	539.0
56.2	84.0	24	0.02	1.680	0.368	511.3
56.2	84.0	24	0.02	1.680	0.368	511.3
56.2	84.5	24	0.02	1.690	0.371	514.4
57.4	86.0	23	0.02	1.720	0.377	515.1
57.4	86.0	23	0.02	1.720	0.377	515.1
58.2	83.0	24	0.02	1.660	0.364	505.2
71.5	101.0	25	0.02	2.020	0.443	625.0
71.5	101.0	25	0.02	2.020	0.443	625.0
71.5	102.0	25	0.02	2.040	0.447	631.2
81.4	117.0	23	0.02	2.340	0.513	700.7
81.4	117.0	23	0.02	2.340	0.513	700.7

$\Delta h$ (mm)	Volumen (ml)	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Longitud del emisor (m)	Q (l/h)	V (m/s)	Re
92.6	120.0	24	0.02	2.400	0.526	730.5
92.6	120.0	24	0.02	2.400	0.526	730.5
107.9	135.0	25	0.02	2.700	0.592	835.5
107.9	134.0	25	0.02	2.680	0.588	829.3
121.5	146.0	24	0.02	2.920	0.640	888.7
121.5	146.0	24	0.02	2.920	0.640	888.7
123.5	151.0	21	0.02	3.020	0.662	858.2
123.5	151.0	21	0.02	3.020	0.662	858.2
145.7	171.0	22	0.02	3.420	0.750	1002.6
145.7	172.0	22	0.02	3.440	0.754	1008.4
170.7	188.0	24	0.02	3.760	0.824	1144.4
170.7	190.0	24	0.02	3.800	0.833	1156.6
229.0	239.0	23	0.02	4.780	1.048	1431.4
229.2	240.0	23	0.02	4.800	1.053	1437.3
229.2	239.0	23	0.02	4.780	1.048	1431.4
470.0	55.0	23	0.75	1.100	0.241	312.6
510.0	58.0	23	0.75	1.160	0.254	329.6
540.0	60.0	23	0.75	1.200	0.263	341.0
620.0	66.0	23	0.75	1.320	0.289	375.1
680.0	71.0	25	0.75	1.420	0.311	416.3
750.0	76.0	23	0.75	1.520	0.333	431.9
810.0	84.0	23	0.75	1.680	0.368	477.4
820.0	85.0	23	0.75	1.700	0.373	483.1
840.0	86.0	23	0.75	1.720	0.377	488.8
850.0	87.0	23	0.75	1.740	0.382	494.5
910.0	94.0	23	0.75	1.880	0.412	534.2
503.0	32.0	23	1.50	0.640	0.140	181.9
572.0	37.0	23	1.50	0.740	0.162	210.3
652.0	41.0	23	1.50	0.820	0.180	233.0
710.0	43.0	23	1.50	0.860	0.189	244.4
820.0	48.0	25	1.50	0.960	0.211	281.4
903.0	53.0	23	1.50	1.060	0.232	301.2
470.0	25.0	26	2.04	0.500	0.110	152.2
568.0	30.0	26	2.04	0.600	0.132	182.6
798.0	36.0	26	2.04	0.720	0.158	219.1
905.0	46.0	30	2.04	0.920	0.202	301.4
910.0	42.0	26	2.04	0.840	0.184	255.7

Tabla 4.2

Diámetro del emisor = 2.22 mm

Tiempo de prueba: 3 minutos

$\Delta h$ (mm)	Volumen (ml)	Temperatura (°C)	Longitud del emisor (m)	Q (l/h)	V (m/s)	Re
5.5	16.0	19	0.02	0.320	0.023	49.0
5.5	17.0	19	0.02	0.340	0.024	52.1
5.7	25.0	19	0.02	0.500	0.036	76.6
5.7	25.0	19	0.02	0.500	0.036	76.6
6.2	30.0	18	0.02	0.600	0.043	90.2
6.2	31.0	18	0.02	0.620	0.044	93.2
6.8	35.0	19	0.02	0.700	0.050	107.2
6.8	35.5	19	0.02	0.710	0.051	108.8
7.0	34.5	21	0.02	0.690	0.050	112.2
7.0	34.5	21	0.02	0.690	0.050	112.2
7.1	72.0	15	0.02	1.440	0.103	201.2
7.1	73.5	15	0.02	1.470	0.105	205.4
7.1	73.0	15	0.02	1.460	0.105	204.0
7.1	63.0	18	0.02	1.260	0.090	189.4
7.1	63.0	18	0.02	1.260	0.090	189.4
7.4	48.5	22	0.02	0.970	0.070	162.7
7.4	48.0	22	0.02	0.960	0.069	161.0
7.4	49.0	22	0.02	0.980	0.070	164.3
7.7	75.0	18	0.02	1.500	0.108	225.4
7.7	75.0	18	0.02	1.500	0.108	225.4
8.0	104.0	15	0.02	2.080	0.149	290.7
8.0	106.0	15	0.02	2.120	0.152	296.3
8.0	106.0	15	0.02	2.120	0.152	296.3
8.0	105.0	15	0.02	2.100	0.151	293.5
8.5	111.0	15	0.02	2.220	0.159	310.2
8.5	109.0	15	0.02	2.180	0.156	304.7
8.7	113.0	18	0.02	2.260	0.162	339.7
8.7	112.0	18	0.02	2.240	0.161	336.7
8.7	111.5	18	0.02	2.230	0.160	335.2
8.7	111.0	18	0.02	2.220	0.159	333.7
9.0	71.0	23	0.02	1.420	0.102	243.3
9.0	71.5	23	0.02	1.430	0.103	245.0
9.3	100.0	20	0.02	2.000	0.144	312.4
9.3	100.0	20	0.02	2.000	0.144	312.4

$\Delta h$ (mm)	Volumen (ml)	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Longitud del emisor (m)	Q (l/h)	V (m/s)	Re
9.6	117.0	14	0.02	2.340	0.168	321.4
9.6	119.0	14	0.02	2.380	0.171	326.9
10.6	133.0	14	0.02	2.660	0.191	365.3
11.7	156.5	18	0.02	3.130	0.225	470.4
11.7	152.5	18	0.02	3.050	0.219	458.4
11.7	153.0	18	0.02	3.060	0.220	459.9
11.7	151.0	19	0.02	3.020	0.217	462.6
12.0	139.0	21	0.02	2.780	0.200	451.9
12.0	138.0	21	0.02	2.760	0.198	448.7
12.0	138.0	21	0.02	2.760	0.198	448.7
13.5	136.0	21	0.02	2.720	0.195	442.2
13.5	137.0	21	0.02	2.740	0.197	445.4
13.5	135.0	21	0.02	2.700	0.194	438.9
14.0	164.0	22	0.02	3.280	0.235	550.1
14.0	162.0	22	0.02	3.240	0.233	543.3
18.0	206.0	21	0.02	4.120	0.296	669.8
18.0	201.0	21	0.02	4.020	0.288	653.5
18.8	197.5	22	0.02	3.950	0.283	662.4
18.8	197.0	22	0.02	3.940	0.283	660.7
18.8	197.0	22	0.02	3.940	0.283	660.7
19.3	215.0	17	0.02	4.300	0.309	622.8
20.7	230.0	18	0.02	4.600	0.330	691.4
20.7	231.0	18	0.02	4.620	0.332	694.4
22.0	237.0	17	0.02	4.740	0.340	686.5
22.0	239.0	17	0.02	4.780	0.343	692.3
22.0	239.0	18	0.02	4.780	0.343	718.4
22.7	246.5	23	0.02	4.930	0.354	844.5
22.7	246.5	23	0.02	4.930	0.354	844.5
22.7	247.0	23	0.02	4.940	0.355	846.2
24.5	251.0	23	0.02	5.020	0.360	860.0
24.6	256.5	23	0.02	5.130	0.368	878.8
24.8	260.0	19	0.02	5.200	0.373	796.6
24.8	265.0	19	0.02	5.300	0.380	811.9
24.8	265.0	20	0.02	5.300	0.380	827.8
34.0	211.0	24	0.02	6.330	0.454	1102.1
34.0	212.5	24	0.02	6.375	0.457	1110.0
34.0	213.0	24	0.02	6.390	0.459	1112.6

**Tabla 4.3**

Diámetro del emisor = 3.75 mm

Tiempo de prueba: 3 minutos

$\Delta h$ (mm)	Volumen (ml)	Temperatura (°C)	Longitud del emisor (m)	Q (l/h)	V (m/s)	Re
4.3	61.0	15	0.02	1.220	0.031	100.9
4.5	21.0	15	0.02	0.420	0.011	34.7
4.9	75.0	15	0.02	1.500	0.038	124.1
4.9	30.0	15	0.02	0.600	0.015	49.6
4.9	36.0	15	0.02	0.720	0.018	59.6
5.2	41.0	15	0.02	0.820	0.021	67.8
5.4	83.0	15	0.02	1.660	0.042	137.3
5.4	46.0	15	0.02	0.920	0.023	76.1
5.7	94.0	15	0.02	1.880	0.047	155.5
5.7	44.0	15	0.02	0.880	0.022	72.8
6.0	42.0	13	0.02	0.840	0.021	64.9
6.0	42.0	13	0.02	0.840	0.021	64.9
6.0	42.0	13	0.02	0.840	0.021	64.9
6.0	54.0	13	0.02	1.080	0.027	83.5
6.0	53.0	13	0.02	1.060	0.027	81.9
6.0	53.0	13	0.02	1.060	0.027	81.9
6.2	66.0	15	0.02	1.320	0.033	109.2
6.5	99.0	13	0.02	1.980	0.050	153.1
6.5	98.0	13	0.02	1.960	0.049	151.5
6.5	96.0	13	0.02	1.920	0.048	148.4
6.5	63.0	15	0.02	1.260	0.032	104.2
6.6	68.0	15	0.02	1.360	0.034	112.5
6.9	162.0	19	0.02	3.240	0.081	293.8
6.9	161.0	19	0.02	3.220	0.081	292.0
6.9	159.0	19	0.02	3.180	0.080	288.4
7.5	103.0	15	0.02	2.060	0.052	170.4
7.5	109.0	15	0.02	2.180	0.055	180.4
7.5	122.5	19	0.02	2.450	0.062	222.2
7.8	71.0	18	0.02	1.420	0.036	126.3
7.9	176.0	14	0.02	3.520	0.089	286.2
7.9	176.0	14	0.02	3.520	0.089	286.2
8.0	95.0	18	0.02	1.900	0.048	169.1
8.0	150.5	19	0.02	3.010	0.076	273.0
8.1	159.0	15	0.02	3.180	0.080	263.1
8.4	179.0	14	0.02	3.580	0.090	291.1
8.5	161.0	14	0.02	3.220	0.081	261.8
8.5	164.0	15	0.02	3.280	0.082	271.4
8.7	151.0	19	0.02	3.020	0.076	273.9
8.7	150.0	19	0.02	3.000	0.075	272.1

$\Delta h$ (mm)	Volumen (ml)	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Longitud del emisor (m)	Q (l/h)	V (m/s)	Re
8.8	177.5	16	0.02	3.550	0.089	298.9
8.9	193.0	13	0.02	3.860	0.097	298.4
9.4	183.0	19	0.02	3.660	0.092	331.9
9.7	226.5	17	0.02	4.530	0.114	388.4
9.8	247.0	15	0.02	4.940	0.124	408.7
10.3	254.0	19	0.02	5.080	0.128	460.7
10.3	256.0	19	0.02	5.120	0.129	464.3
10.3	253.5	19	0.02	5.070	0.128	459.8
11.0	204.0	13	0.02	4.080	0.103	315.4
11.9	328.5	16	0.02	6.570	0.165	553.3
13.0	363.0	15	0.02	7.260	0.183	600.6
13.0	360.0	16	0.02	7.200	0.181	606.3
13.3	376.5	15	0.02	7.530	0.189	623.0
17.9	387.0	18	0.02	7.740	0.195	688.7
18.9	285.0	13	0.02	8.550	0.215	661.0
18.9	284.0	13	0.02	8.520	0.214	658.7
30.0	100.0	22	0.75	2.000	0.050	187.5
50.0	225.0	18	0.75	4.500	0.113	385.8
50.0	151.0	22	0.75	3.020	0.076	283.1
50.0	195.0	40	0.75	3.900	0.098	547.4
100.0	375.0	18	0.75	7.500	0.189	643.1
100.0	276.0	22	0.75	5.520	0.139	517.5
100.0	333.5	40	0.75	6.670	0.168	936.3
150.0	510.0	18	0.75	10.200	0.257	874.5
150.0	381.5	22	0.75	7.630	0.192	715.3
150.0	445.0	40	0.75	8.900	0.224	1249.3
200.0	471.0	22	0.75	9.420	0.237	883.1
200.0	540.0	40	0.75	10.800	0.272	1516.0
250.0	640.0	40	0.75	12.800	0.322	1796.7
50.0	95.5	30	1.50	1.910	0.048	214.3
50.0	95.5	23	1.50	1.910	0.048	182.6
50.0	119.0	40	1.50	2.380	0.060	334.1
100.0	169.5	30	1.50	3.390	0.085	380.4
100.0	169.5	23	1.50	3.390	0.085	324.1
100.0	247.5	19	1.50	4.950	0.124	433.9
100.0	212.0	40	1.50	4.240	0.107	595.2
150.0	238.5	30	1.50	4.770	0.120	535.2
150.0	238.5	23	1.50	4.770	0.120	456.0
150.0	325.0	19	1.50	6.500	0.163	569.7
150.0	285.0	40	1.50	5.700	0.143	800.1
200.0	296.0	30	1.50	5.920	0.149	664.2
200.0	296.0	23	1.50	5.920	0.149	565.9
200.0	409.5	19	1.50	8.190	0.206	717.9

$\Delta h$ (mm)	Volumen (ml)	Temperatura (°C)	Longitud del emisor (m)	Q (l/h)	V (m/s)	Re
200.0	352.0	40	1.50	7.040	0.177	988.2
250.0	347.5	30	1.50	6.950	0.175	779.8
250.0	347.5	23	1.50	6.950	0.175	664.4
250.0	416.0	40	1.50	8.320	0.209	1167.9
300.0	394.0	30	1.50	7.880	0.198	884.1
300.0	394.0	23	1.50	7.880	0.198	753.3
300.0	470.0	40	1.50	9.400	0.236	1319.5
50.0	68.0	40	3.00	1.360	0.034	190.9
50.0	51.0	22	3.00	1.020	0.026	95.6
100.0	124.0	40	3.00	2.480	0.062	348.1
100.0	97.5	22	3.00	1.950	0.049	182.8
150.0	175.5	40	3.00	3.510	0.088	492.7
150.0	198.0	18	3.00	3.960	0.100	339.5
150.0	135.5	22	3.00	2.710	0.068	254.1
200.0	216.5	40	3.00	4.330	0.109	607.8
200.0	255.0	18	3.00	5.100	0.128	437.3
200.0	171.0	22	3.00	3.420	0.086	320.6
250.0	258.5	40	3.00	5.170	0.130	725.7
250.0	300.0	18	3.00	6.000	0.151	514.4
250.0	205.5	22	3.00	4.110	0.103	385.3
300.0	293.0	40	3.00	5.860	0.147	822.6
300.0	345.0	18	3.00	6.900	0.174	591.6
300.0	242.5	22	3.00	4.850	0.122	454.7
350.0	390.0	18	3.00	7.800	0.196	668.8
400.0	447.0	18	3.00	8.940	0.225	766.5

Tabla 4.4

Diámetro del emisor = 4.76 mm

Tiempo de prueba: 3 minutos

$\Delta h$ (mm)	Volumen (ml)	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Longitud del emisor (m)	Q (l/h)	V (m/s)	Re
3.0	38.2	20	0.02	0.764	0.012	55.7
3.0	38.0	20	0.02	0.760	0.012	55.4
3.0	37.8	20	0.02	0.756	0.012	55.1
3.7	42.0	13	0.02	0.840	0.013	51.2
3.8	64.0	13	0.02	1.280	0.020	78.0
3.8	63.0	13	0.02	1.260	0.020	76.7
4.0	87.0	20	0.02	1.740	0.027	126.8
4.0	87.5	20	0.02	1.750	0.027	127.5
4.2	64.0	14	0.02	1.280	0.020	82.0
4.2	63.0	14	0.02	1.260	0.020	80.7
4.4	87.0	13	0.02	1.740	0.027	106.0
4.4	88.0	13	0.02	1.760	0.027	107.2
4.5	96.0	16	0.02	1.920	0.030	127.4
4.5	102.0	20	0.02	2.040	0.032	148.6
4.5	100.5	18	0.02	2.010	0.031	140.9
4.5	99.0	18	0.02	1.980	0.031	138.8
4.6	102.0	13	0.02	2.040	0.032	124.2
4.6	100.0	15	0.02	2.000	0.031	130.4
4.7	125.0	19	0.02	2.500	0.039	178.6
4.7	125.5	20	0.02	2.510	0.039	182.8
4.7	126.0	20	0.02	2.520	0.039	183.6
4.9	106.0	21	0.02	2.120	0.033	160.7
4.9	110.5	21	0.02	2.210	0.034	167.6
4.9	106.0	21	0.02	2.120	0.033	160.7
5.0	180.0	18	0.02	3.600	0.056	252.3
5.0	179.0	18	0.02	3.580	0.056	250.9
5.1	160.0	14	0.02	3.200	0.050	205.0
5.1	159.0	14	0.02	3.180	0.050	203.7
5.2	187.0	16	0.02	3.740	0.058	248.1
5.2	187.0	17	0.02	3.740	0.058	252.6
5.2	168.0	14	0.02	3.360	0.052	215.2
5.3	150.5	21	0.02	3.010	0.047	228.2
5.3	148.5	21	0.02	2.970	0.046	225.2
5.3	147.5	21	0.02	2.950	0.046	223.7
5.3	147.0	21	0.02	2.940	0.046	222.9
5.4	204.0	16	0.02	4.080	0.064	270.7
5.5	143.5	22	0.02	2.870	0.045	224.5
5.5	142.5	22	0.02	2.850	0.044	222.9
5.5	142.0	22	0.02	2.840	0.044	222.1

$\Delta h$ (mm)	Volumen (ml)	Temperatura (°C)	Longitud del emisor (m)	Q (l/h)	V (m/s)	Re
5.6	182.5	22	0.02	3.650	0.057	285.5
5.6	180.0	22	0.02	3.600	0.056	281.6
5.6	176.0	22	0.02	3.520	0.055	275.3
5.6	174.0	22	0.02	3.480	0.054	272.2
5.8	188.5	22	0.02	3.770	0.059	294.9
5.8	188.0	22	0.02	3.760	0.059	294.1
5.8	187.5	22	0.02	3.750	0.059	293.3
6.0	277.5	23	0.02	5.550	0.087	443.4
6.0	276.0	23	0.02	5.520	0.086	441.0
6.0	283.0	16	0.02	5.660	0.088	375.5
6.0	282.0	16	0.02	5.640	0.088	374.2
6.0	281.0	16	0.02	5.620	0.088	372.8
6.1	230.0	23	0.02	4.600	0.072	367.5
6.1	227.0	23	0.02	4.540	0.071	368.7
6.1	225.0	24	0.02	4.500	0.070	365.4
6.2	348.8	20	0.02	6.975	0.109	508.1
6.2	345.8	20	0.02	6.915	0.108	503.7
6.2	340.5	20	0.02	6.810	0.106	496.1
6.2	339.8	20	0.02	6.795	0.106	495.0
6.2	343.5	20	0.02	6.870	0.107	500.4
6.2	357.0	20	0.02	7.140	0.111	520.1
6.6	361.5	19	0.02	7.230	0.113	516.5
6.6	357.0	19	0.02	7.140	0.111	510.1
6.6	354.0	19	0.02	7.080	0.111	505.8
6.6	352.5	19	0.02	7.050	0.110	503.7
6.7	405.0	25	0.02	8.100	0.126	668.7
6.7	405.0	25	0.02	8.100	0.126	668.7
6.7	400.5	25	0.02	8.010	0.125	661.3
7.0	376.5	20	0.02	7.530	0.118	548.5
7.0	372.0	20	0.02	7.440	0.116	542.0
7.0	369.0	20	0.02	7.380	0.115	537.6
7.0	369.0	20	0.02	7.380	0.115	537.6
7.3	393.0	20	0.02	7.860	0.123	572.6
7.3	387.0	20	0.02	7.740	0.121	563.8
10.0	112.5	40	0.75	2.250	0.035	248.7
10.0	105.0	28	0.75	2.100	0.033	177.4
30.0	208.5	40	0.75	4.170	0.065	460.8
30.0	194.5	28	0.75	3.890	0.061	328.5
60.0	302.5	40	0.75	6.050	0.094	668.6
60.0	290.0	28	0.75	5.800	0.090	489.9
80.0	349.5	40	0.75	6.990	0.109	772.5
80.0	335.0	28	0.75	6.700	0.104	565.9

$\Delta h$ (mm)	Volumen (ml)	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Longitud del emisor (m)	Q (l/h)	V (m/s)	Re
100.0	397.5	40	0.75	7.950	0.124	878.6
100.0	372.5	28	0.75	7.450	0.116	629.2
110.0	413.0	40	0.75	8.260	0.129	912.9
110.0	385.0	28	0.75	7.700	0.120	650.3
120.0	422.5	40	0.75	8.450	0.132	933.9
120.0	405.0	28	0.75	8.100	0.126	684.1
10.0	80.8	30	1.50	1.615	0.025	142.7
20.0	153.5	30	1.50	3.070	0.048	271.2
20.0	145.0	40	1.50	2.900	0.045	320.5
20.0	141.0	28	1.50	2.820	0.044	238.2
30.0	217.5	30	1.50	4.350	0.068	384.3
30.0	182.5	40	1.50	3.650	0.057	403.4
30.0	178.0	28	1.50	3.560	0.056	300.7
40.0	273.8	30	1.50	5.475	0.085	483.6
40.0	214.5	40	1.50	4.290	0.067	474.1
40.0	210.0	28	1.50	4.200	0.065	354.7
60.0	267.5	40	1.50	5.350	0.083	591.3
60.0	262.5	28	1.50	5.250	0.082	443.4
90.0	330.5	40	1.50	6.610	0.103	730.5
90.0	325.0	28	1.50	6.500	0.101	549.0
120.0	381.0	40	1.50	7.620	0.119	842.1
120.0	377.5	28	1.50	7.550	0.118	637.7
130.0	406.0	40	1.50	8.120	0.127	897.4
130.0	400.0	28	1.50	8.000	0.125	675.7
30.0	142.5	28	3.00	2.850	0.044	240.7
30.0	145.0	40	3.00	2.900	0.045	320.5
40.0	169.5	28	3.00	3.390	0.053	286.3
40.0	172.5	40	3.00	3.450	0.054	381.3
50.0	189.0	28	3.00	3.780	0.059	319.3
50.0	195.0	40	3.00	3.900	0.061	431.0
60.0	211.0	28	3.00	4.220	0.066	356.4
60.0	226.0	40	3.00	4.520	0.070	499.5
90.0	277.0	28	3.00	5.540	0.086	467.9
90.0	282.0	40	3.00	5.640	0.088	623.3
120.0	314.0	28	3.00	6.280	0.098	530.4
120.0	317.0	40	3.00	6.340	0.099	700.7
130.0	342.5	28	3.00	6.850	0.107	578.5
130.0	350.0	40	3.00	7.000	0.109	773.6
150.0	370.0	28	3.00	7.400	0.115	625.0
150.0	377.5	40	3.00	7.550	0.118	834.4
160.0	385.0	28	3.00	7.700	0.120	650.3
160.0	393.0	40	3.00	7.860	0.123	868.7

#### 4.4.3 Pruebas de tensión superficial

Por tratarse de diámetros diminutos en un sistema de riego por goteo, fuerzas de inercia, presión y viscosas también pequeñas, surge la duda de si la tensión superficial que actúa en la salida de los emisores al gotear o chorrear el agua interviene en los resultados y si es así qué tanto lo hace. Para averiguar esto se hicieron cuatro ensayos, dos utilizando agua y dos con petróleo diáfano, se escogieron estos dos líquidos por tener una diferencia en su viscosidad y ver si existía tal influencia.

La prueba consistió en encontrar el gasto para una misma carga, con el goteo descargando libremente a la atmósfera y con el gotero sumergido en el mismo líquido (caso en donde la tensión superficial no actúa), para ambos líquidos según se puede ver en la Figura 4.6.

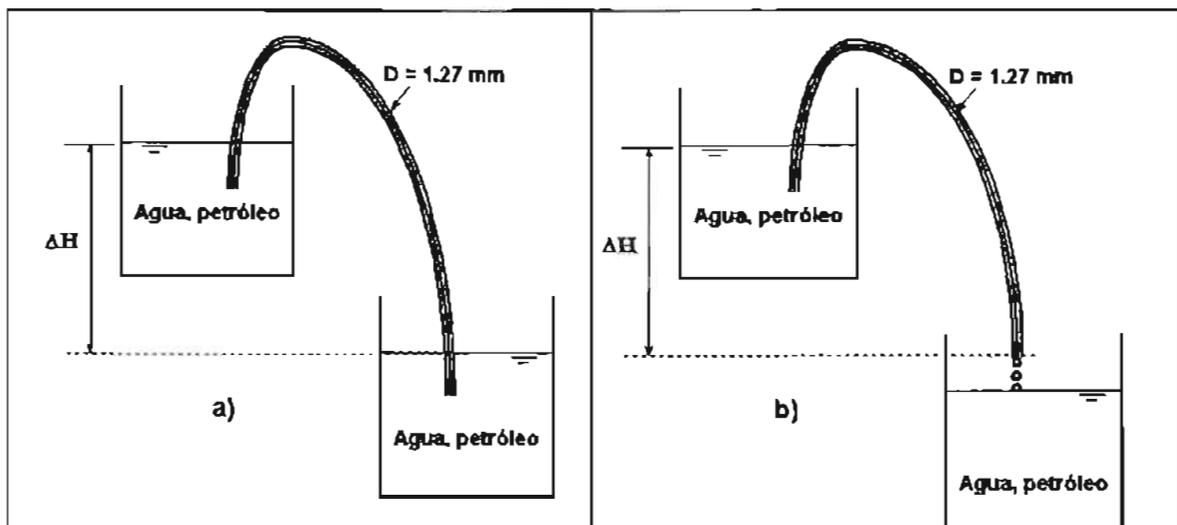


Figura 4.6. Ensayos para observar la influencia de la tensión superficial en los goteros, longitud del emisor 0.72 m.

## 5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Como se vio en los Capítulos 3 y 4 el problema se dividió en dos partes: primero, calcular la caída de presión en la lateral para diferentes descargas por emisor con la ecuación de Blasius, ver (Echávez, et al., 1997) y, segundo, se evaluaron las pérdidas de carga hidráulica desde la conexión con la lateral hasta la salida del emisor, lo que se presentará a continuación.

### 5.1 Hidráulica de las tuberías laterales

La pérdida de carga usada, fue calculada con la ecuación 3.1, la cual toma en cuenta que es un flujo espacialmente variado, lo que se puede ver en la Figura 5.1.

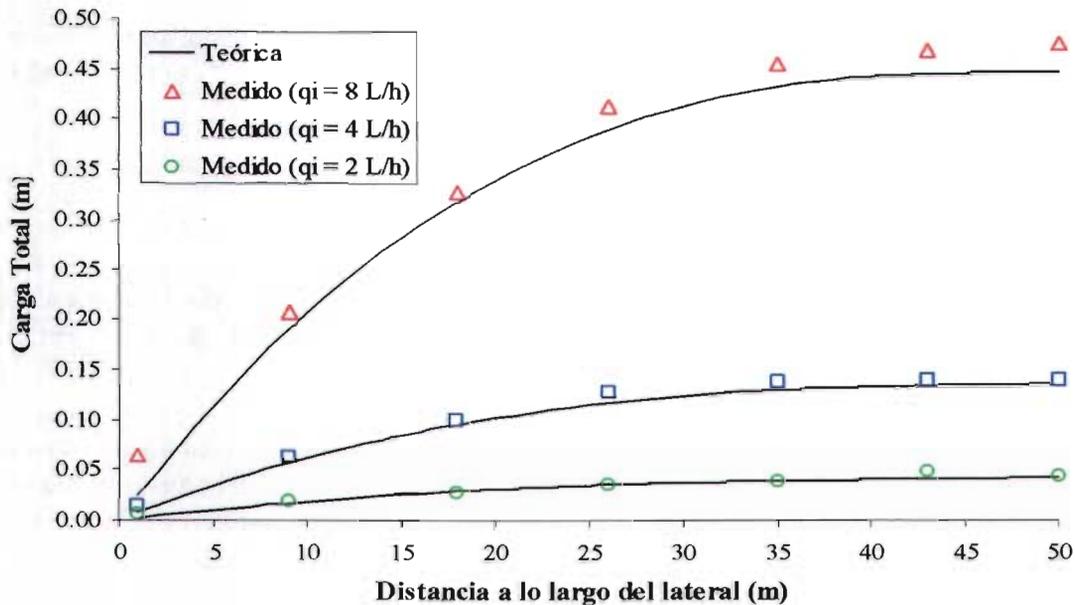


Figura 5.1. Pérdida de carga lateral calculada y medida para tres diferentes gastos de emisor. Diámetro 1.67 cm (1/2" nominal), longitud del lateral 50 m y emisores a cada metro.

Para una mejor ajuste entre los valores calculados y medidos, con una diferencia en el numerador de la ecuación de Blasius  $f_i = \frac{0.316}{Re_i^{0.25}}$  por 0.325, como en Bagarello et al. (1995, 1997), ver Figura 5.2, esto para números de Reynolds mayores a 2000.

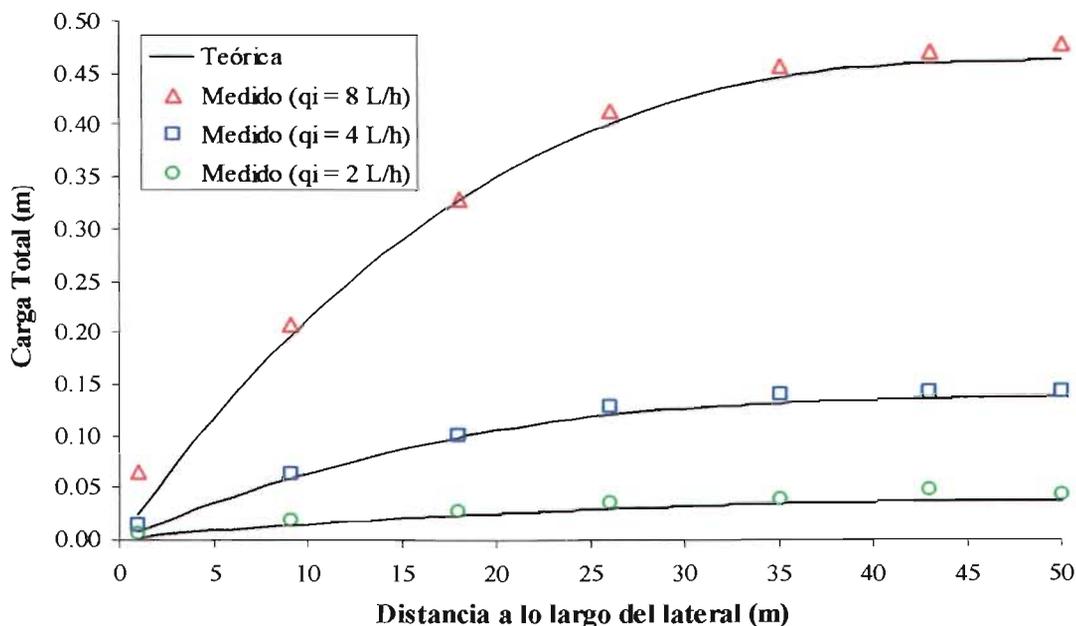


Figura 5.2. Calculada (con 0.325 en el numerador de la fórmula de Blasius) y medida la pérdida de carga para tres diferentes gastos del emisor. Diámetro 1.67 cm (1/2" nominal), longitud del lateral 50 m y emisores a cada metro.

## 5.2 Hidráulica de los emisores

Para obtener el coeficiente de pérdida por entrada,  $k_e$ , se hicieron 375 ensayos en la instalación experimental descrita en el capítulo 4, para un número de Reynolds entre 30 y 900.

La pérdida de carga en los emisores se dividió en dos partes, cuando la longitud del emisor es menor que la longitud de transición y cuando la longitud del emisor es mayor que la longitud de transición se puede estimar con las siguientes ecuaciones:

$$\Delta h_i = k_e \frac{v^2}{2g} + f \frac{l_i}{d_i} \frac{v^2}{2g} + \alpha \frac{v^2}{2g} \quad \text{para } l_i < l_e \quad (5.1)$$

$$\Delta h_i = k_e \frac{v^2}{2g} + f \frac{l_i}{d_i} \frac{v^2}{2g} + 2 \frac{v^2}{2g} \quad \text{para } l_i > l_e \quad (5.2)$$

donde:

- $k_e$ , coeficiente de pérdida por entrada,
- $l_i$ , longitud del emisor,
- $d_i$ , diámetro del emisor,
- $f$ , coeficiente de fricción,
- $v$ , velocidad en el emisor,
- $g$ , aceleración de la gravedad,
- $\Delta h_i$ , pérdida de carga en el emisor.

### 5.2.1 Coeficiente de pérdida de entrada para $l_i < l_e$

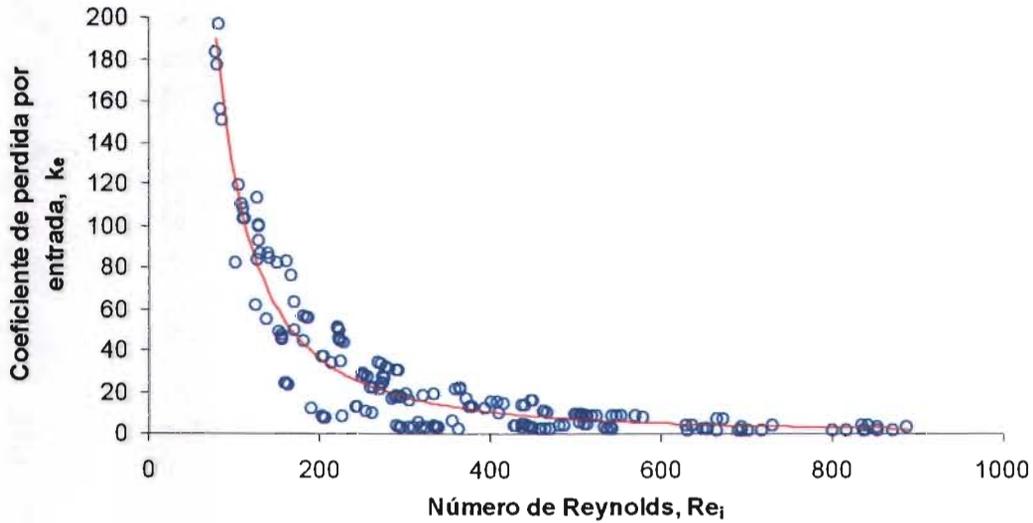


Figura 5.3. Coeficiente de pérdida de entrada  $k_e$  versus  $Re_i$  para diferentes  $l_i/d_i$  y  $l_i < l_e$ .

Para propósitos de diseño, la curva de tendencia de los puntos de la Figura 5.3 se representa con la ecuación:

$$k_e = \frac{439,950}{Re_i^{1.777}} \quad (5.3)$$

### 5.2.2 Coeficiente de pérdida de entrada para $l_i > l_e$

En forma similar para  $l_i > l_e$ , el coeficiente de pérdida por entrada contra el número de Reynolds para diferentes  $l_i/d_i$  se representan en la Figura 5.4.

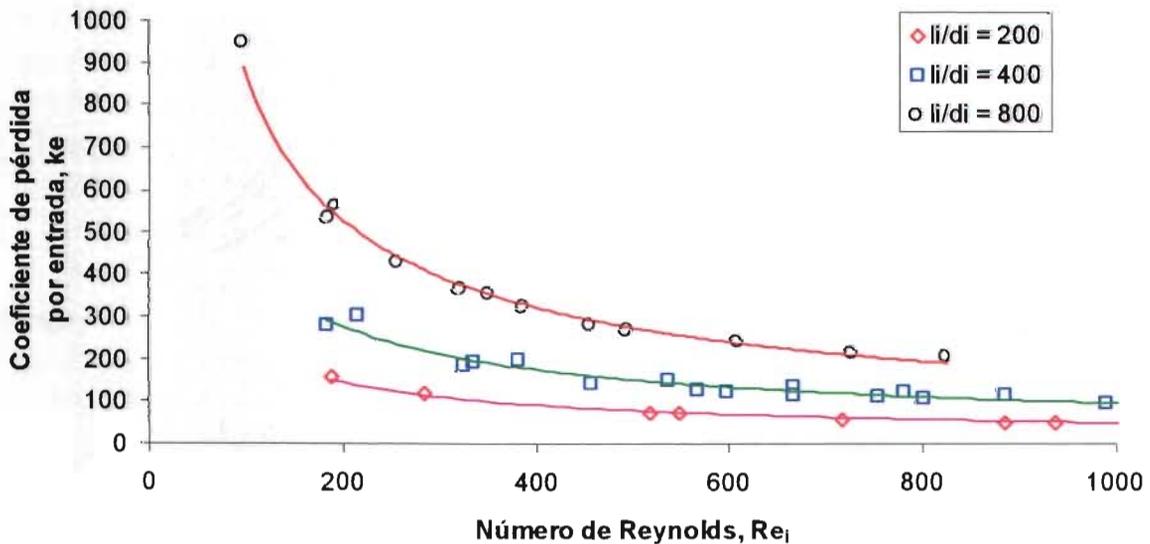


Figura 5.4. Coeficiente de pérdida por entrada versus  $Re_i$ , para diferentes  $l_i/d_i$  y  $l_i > l_e$ .

Ahora, la longitud del tubo emisor influye en el coeficiente  $k_e$  y se puede representar para diferentes relaciones de  $l_i/d_i$  con las expresiones siguientes:

$l_i/d_i = 200$	$l_i/d_i = 400$	$l_i/d_i = 800$	(5.5)
$k_e = \frac{6449}{Re_i^{0.7102}}$	$k_e = \frac{11,000}{Re_i^{0.7}}$	$k_e = \frac{21,645}{Re_i^{0.7068}}$	

Con un coeficiente de correlación de 0.98.

### 5.3 Gráficas auxiliares

Se encontró que los números adimensionales que se pudieran presentar en una grafica son el número de Reynolds, el número de Euler y la relación geométrica  $l_i/d_i$ , en la Figura 5.5 y Figura 5.6 se muestran estos números adimensionales tanto para ambas relaciones de  $l_i < l_e$  y  $l_i > l_e$ .

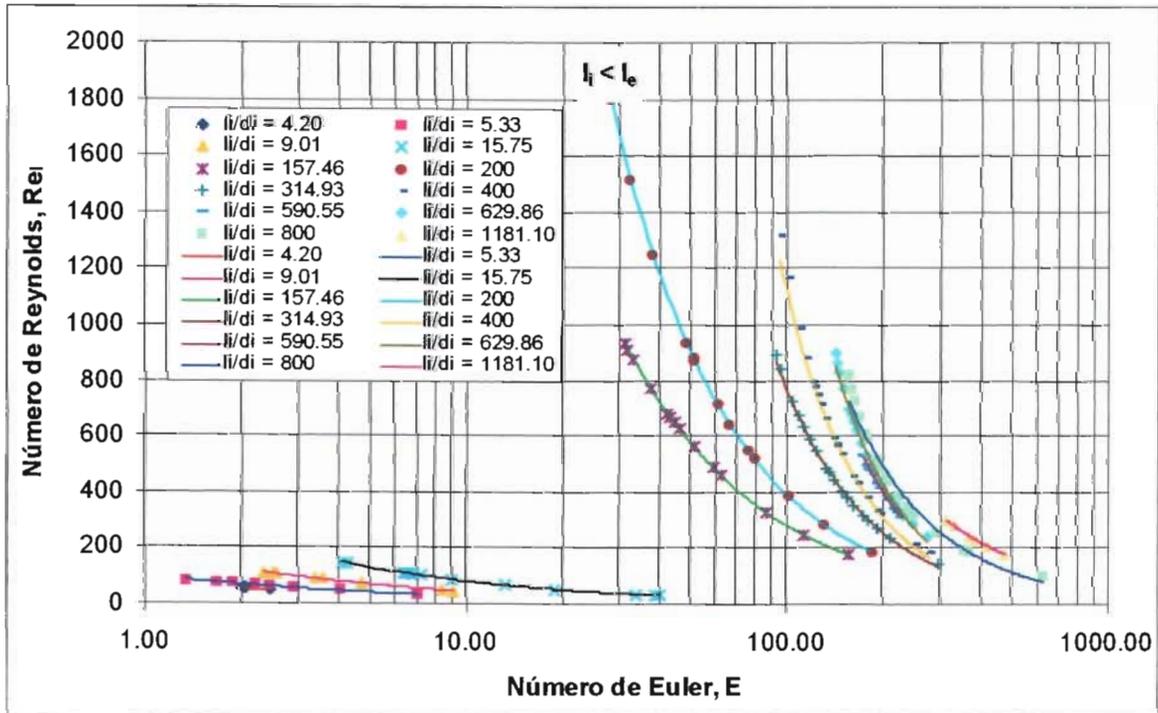


Figura 5.5. E vs Re para diferentes relaciones  $l_i/d_i$  y  $l_i < l_e$ .

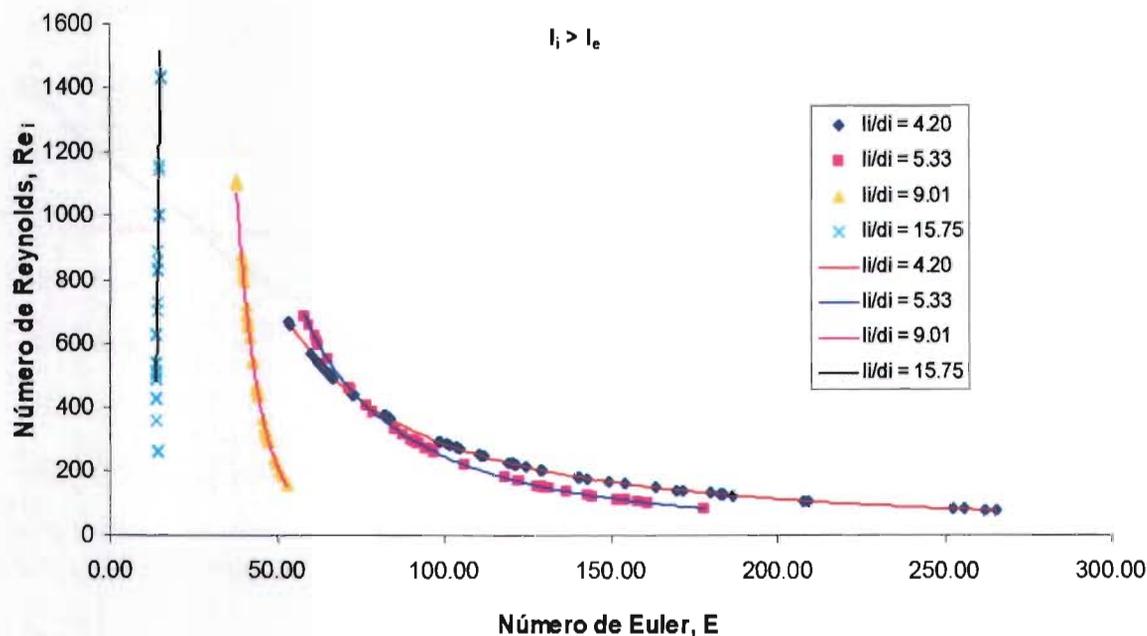


Figura 5.6. E vs Re para diferentes relaciones  $l_i/d_i$  y  $l_i > l_e$ .

#### 5.4 Comparación con otros resultados de sistemas similares

En este apartado compararemos los resultados obtenidos en el presente trabajo con el de dos experimentaciones distintas para sistemas de riego por goteo o micro irrigación. Las experimentaciones son de Yaohu (1996) y Juana (2002).

En el trabajo de Yaohu, se presenta un ejemplo con los siguientes datos:

- $d_i$ , diámetro del lateral = 0.016 m
- S, separación entre emisores = 1 m
- $q_i$ , gasto del emisor = 12 l/h
- k, factor de pérdida por conexión = 0.3
- $L_r$ , longitud del emisor = 1.2 m
- $D_r$ , Diámetro del emisor = 0.005 m

Los resultados que obtuvo Yaohu, cambiando el diámetro del emisor, de 0.016 m a 0.0254 m, se pueden ver en la Figura 5.7, en la cual se puede observar que existe una gran diferencia entre ambas gráficas, ya que entre el diámetro del emisor sea más pequeño, las pérdidas serán más grandes y por lo tanto al aumentar el diámetro del emisor éstas se reducen considerablemente.

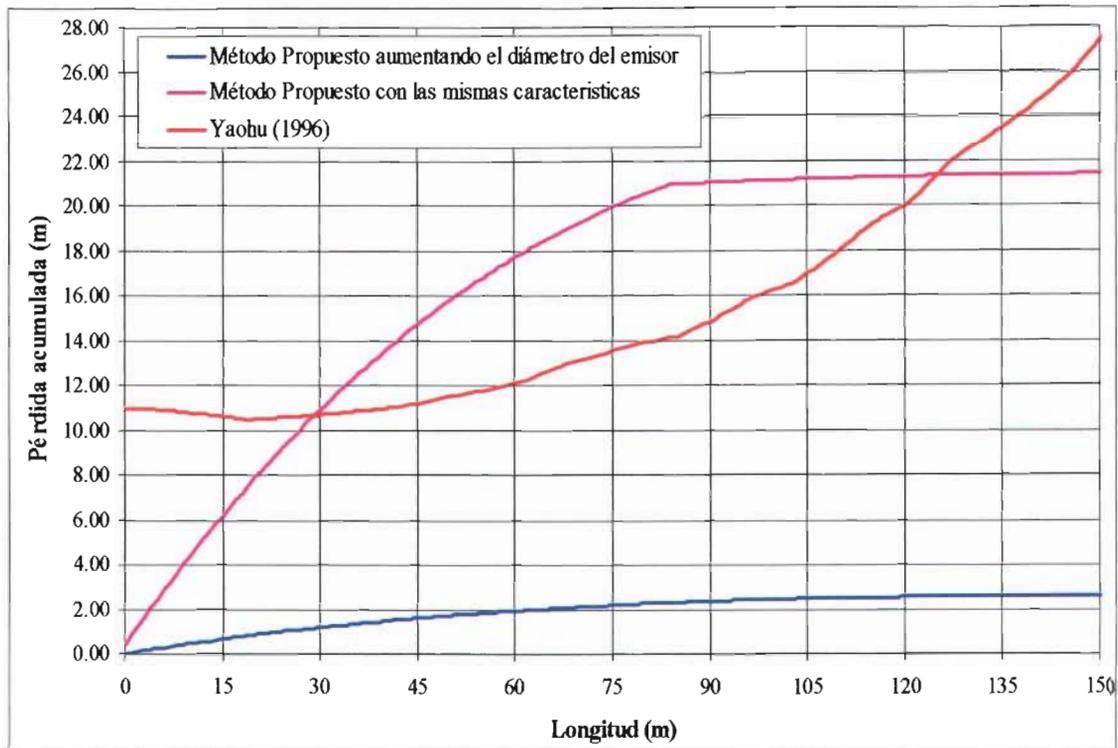


Figura 5.7. Comparación de los resultados entre el método de Yaohu (1996) y el aquí propuesto.

En el trabajo de Juana (2002), presenta los resultados en una gráfica típica de carga piezométrica. Con los siguientes datos:

- $d_i$ , diámetro de la lateral = 0.0133 m
- $S$ , separación entre emisores = 0.6 m
- $q_i$ , gasto del emisor = 6 l/h
- $L_e$ , longitud equivalente = 0.26 m
- $D_r$ , Diámetro del emisor = 0.009 m

Al utilizar el método de Juana (2002) - con un aumento del diámetro del emisor de 0.0133 m a 0.0254 m- y el método aquí propuesto se encuentra una gran diferencia entre ambos, como se puede ver en la Figura 5.8.

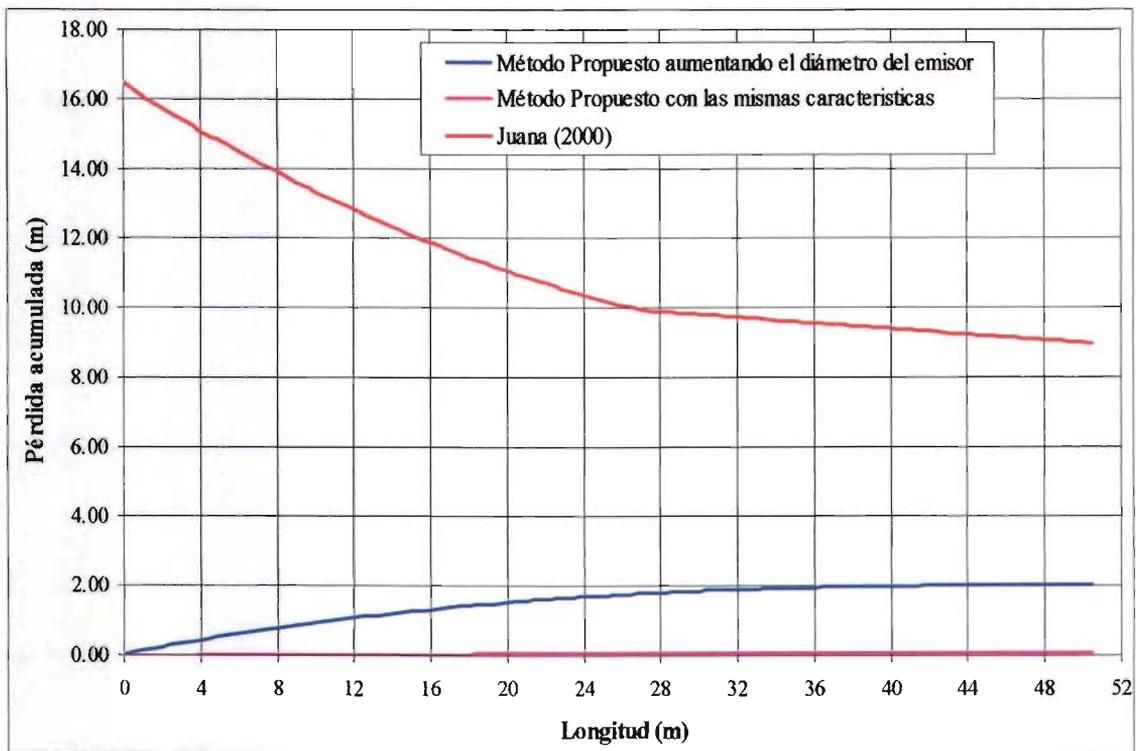


Figura 5.8. Comparación de los resultados de Juana (2002) y los del método propuesto.

Las diferencias encontradas se justifican por ser emisores diferentes y muestran el amplio rango de funcionamiento para sistemas similares con, aparentemente, pequeñas variantes.



## 6. DISEÑO DE LA RED

A continuación se presentarán algunos antecedentes y consideraciones que conviene tomar en cuenta en el diseño de las laterales y de los emisores del sistema RPBC, así como los criterios y gráficas necesarios para el diseño de este sistema.

### 6.1 Laterales

#### 6.1.1 Tipos

Se denominan tuberías a presión o conducciones forzadas, a aquellos conductos que funcionan a plena sección y en los que el movimiento del líquido no depende exclusivamente de una pendiente continua, como en los canales, sino que pueden funcionar aun en contra pendiente.

Definición de términos utilizados en el presente trabajo:

- Tubo: Es un elemento recto normal de sección circular.
- Tubería: Es la sucesión de tubos, piezas especiales y dispositivos convenientemente unidos, mediante juntas, de modo que formen un conducto largo.
- Piezas especiales: Son unidades que permiten hacer cambios de dirección, empalmes, derivaciones, cambios de sección, etc.
- Juntas: Son elementos que sirven para unir tubos y piezas especiales.

#### 6.1.2 Materiales

Por lo que respecta a los materiales generalmente utilizados en la fabricación de tubos, se pueden clasificar de la manera siguiente:

- Fundición: En la actualidad los tubos de fundición de hierro se fabrican por centrifugación vertiendo el hierro fundido en moldes giratorios. Para evitar incrustaciones y corrosiones los tubos suelen revestirse interiormente con cemento, betún asfáltico, pinturas plásticas u otras sustancias protectoras. Si la fundición se encuentra exenta de fósforo y azufre estos tubos pueden soportar presiones de unas 20 atmósferas.
- Aleación de acero: Las láminas rectangulares de acero laminado se doblan o remachan longitudinalmente, o bien se sueldan longitudinalmente (tubos soldados). Los tubos de pequeño diámetro pueden fabricarse sin soldaduras (tubos estirados).
- Aleación de hierro: Las placas rectangulares son de hierro laminado y se pegan longitudinalmente.
- Hierro galvanizado o acero galvanizado: Son tubos como los anteriormente mencionados, cubiertos con una capa de zinc.
- Hormigón en masa: Estos tubos se utilizan únicamente para tuberías que funcionan por gravedad, sin presión interior o muy reducida ni carga

exterior, en las que una filtración hacia el interior o exterior del tubo no tiene consecuencias. Se emplea para riego, saneamientos agrícolas y alcantarillado.

- Hormigón armado: Estos tubos suelen fabricarse por el sistema de centrifugado y tienen armadura metálica longitudinal, compuesta por anillos de acero y refuerzo transversal. Resisten grandes presiones y evitan la flexión de los anillos de acero, trabajando bien a compresión. Son muy utilizados en pasos de ferrocarril, carreteras, pistas de aterrizaje y para abastecimientos de agua con grandes caudales.
- Hormigón pretensado: El hormigón está reforzado con armadura tensada en todo o en parte. Se utiliza para aquellas aplicaciones donde se presenten altas presiones.
- Aluminio: Este material suele emplearse en las instalaciones móviles de riego por aspersión, debido a su peso ligero.
- Polietileno de alta densidad: Denominado internacionalmente como HDPE, es un tipo de tubería producto de los últimos avances en ingeniería de materiales, que posee características similares a las del polietileno; pero adicionalmente se logra que las tuberías construidas con este material sean especialmente resistentes a la abrasión, impactos, ataques químicos etc.
- Plástico: Los tubos de PVC (policloruro de vinilo no plastificado) y PE (polietileno), son de escasa rugosidad interna, pueden ser rígidos o flexibles, siendo ambos fácilmente manejables por su poco peso.

De todas las clases de tubos descritos los más específicos y utilizados en el riego localizado, y por ende en el RPBC, son los de plástico, tanto los de policloruro de vinilo no plastificado (PVC) como todos los de polietileno (PE) en todas sus presentaciones de baja densidad (LDPE), mediana densidad (MDPE) y de alta densidad (HDPE).

### 6.1.3 Tubo de PVC

El PVC (Policloruro de Vinilo no Plastificado) es el producto de la polimerización del monómero de cloruro de vinilo a policloruro de vinilo. La resina que resulta de esta polimerización es la más versátil de la familia de los plásticos; pues además de ser termoplástico, a partir de ella se pueden obtener productos rígidos y flexibles. Debido a sus diferentes procesos de polimerización, se pueden obtener con el PVC compuestos en forma de polvo o pelet, plastisoles, soluciones y emulsiones, para a su vez llegar a obtener mediante su procesado, un sin número de productos terminados.

Además de su gran versatilidad, el PVC es la resina sintética más compleja y difícil de formular y procesar, pues requiere de un número importante de ingredientes y un balance adecuado de éstos para poder transformarlo al producto final deseado.

Merece mención especial B.F. Goodrich Chemical que en 1932 descubrió que el PVC absorbía plastificante y que al procesarse se transformaba en un producto flexible. Este descubrimiento hizo posible el desarrollo comercial inicial. Posteriormente con el empleo de estabilizadores más adecuados se hizo posible el desarrollo del mercado del PVC rígido;

de estabilizadores más adecuados se hizo posible el desarrollo del mercado del PVC rígido; estos dos importantes desarrollos permitieron que el PVC se convirtiera en el termoplástico más versátil e importante del mercado mundial.

En nuestro caso los tubos de plástico rígido fabricados a partir de una materia prima compuesta esencialmente de resina sintética de PVC, mezclada con la proporción mínima indispensable de aditivos colorantes, estabilizantes y lubricantes y, en todo caso, exenta de plastificantes y de materiales de relleno. En la terminología industrial se denominan tubos de PVC no plastificados o simplemente PVC.

#### 6.1.3.1 Características generales, geométricas, térmicas y químicas del PVC

El policloruro de vinilo no plastificado, después de su conversión en tubos o accesorios acabados, cumple las características técnicas que se establecen a continuación:

##### Características generales

- Peso específico: 1350 a 1460 kg/m<sup>3</sup>.
- Opacidad: < 0.2%.
- Inflamabilidad: No debe ser combustible.
- Los tubos deben ser sensiblemente rectos y cilíndricos, exterior e interiormente. Su acabado es pulido y brillante, con coloración uniforme y tonalidad opaca que evite la penetración de la luz exterior.
- No deben presentar ondulaciones, estrías, grietas, burbujas, ni otros defectos que puedan perjudicar su normal utilización, tanto en la superficie exterior como en la interior o en una sección transversal.
- Los extremos están cortados ortogonalmente a las generatrices.
- Los tubos podrán ser trabajados mecánicamente (cortados, taladrados, fresados, etcétera).

##### Características geométricas

- Longitud: La longitud del tubo es la distancia entre los extremos del mismo medida a  $23 \pm 2$  °C.
- Diámetro nominal. Es el diámetro exterior definido por el fabricante, a partir del cual se establecen las tolerancias y sirve de referencia para designar y clasificar, por medidas, los diversos elementos de una conducción acoplables entre sí.
- Factor de corrección aplicable a la presión nominal para obtener la presión de trabajo e igual a 0.8 para temperaturas entre 25 a 35 °C y 0.63 para temperaturas entre 35 a 45 °C.

##### Características mecánicas

- Esfuerzo tangencial de trabajo: 10 MPa.
- Resistencia a la tracción mínima:  $\sigma_{\min} = 49$  MPa.
- Alargamiento mínimo en la rotura: 80%.

##### Características químicas

- Debe presentar resistencia a la acetona y al ácido sulfúrico.

### 6.1.3.2 Características hidráulicas del PVC

El pulimento y la uniformidad de la superficie cilíndrica interior de los tubos y juntas serán tales que podrán aplicarse para el cálculo de los distintos parámetros hidráulicos, ecuaciones para tubos lisos, como la fórmula de Darcy Weisbach, teniendo en cuenta el correspondiente número de Reynolds ( $R_e$ ) y con una rugosidad absoluta de 0.02 mm para la tubería (tubos más juntas).

### 6.1.4 Tubo de polietileno (PE)

Es un plástico derivado del etileno (hidrocarburo gaseoso acíclico no saturado), al que se somete a un proceso de calentamiento y presión que provoca la polimerización. Sus propiedades dependen de su peso molecular, de su densidad y de la distribución estadística de los diferentes pesos moleculares de las macromoléculas.

Los tubos de polietileno son producidos a base de resinas de polietileno y un aditivo de negro de humo que los protege contra la acción de los rayos ultravioleta y, por tanto, aumenta su estabilidad química. Los producidos por extrusión simple contienen un 2.5 a 0.5% en peso de negro de humo, mientras que los obtenidos por extrusión simultánea y múltiple contienen esa proporción de negro de humo sólo en su capa exterior.

#### 6.1.4.1 Características generales geométricas, térmicas y químicas de PE

Los tubos de PE acabados tienen las siguientes características, todas ellas dadas para unas condiciones de ambiente de  $20 \pm 2$  °C de temperatura y  $50 \pm 5\%$  de humedad relativa.

**Polietileno de baja densidad (LDPE):** Densidad de la resina base (polietileno incoloro) menor o igual que  $930 \text{ kg/m}^3$ . Son tubos relativamente blandos y flexibles (no rígidos). El esfuerzo tangencial de trabajo a 20 °C será de 3.2 MPa. Su resistencia química es buena, pero al calor es relativamente baja.

- Resistencia mínima a la tracción: 10 MPa.
- Índice de fluidez menor de 1 g/10 min.
- Alargamiento mínimo en la rotura: 350%.

**Polietileno de mediana densidad (MDPE):** Densidad de la resina entre 931 a  $940 \text{ kg/m}^3$ . Son tubos relativamente menos flexibles, más duros y más resistentes a la temperatura que los de LDPE. El esfuerzo tangencial de trabajo a 20 °C será de 5.0 MPa.

- Su resistencia química es parecida al de LDPE.
- Resistencia mínima a la tracción: 15 MPa.
- Índice de fluidez menor de 0.4 g/10 min.
- Alargamiento mínimo en la rotura: 350%.

**Polietileno de alta densidad (HDPE):** Densidad de la resina base superior a  $940 \text{ kg/m}^3$ . Son tubos relativamente rígidos y duros. Tienen la máxima resistencia a la

temperatura y a los agentes químicos. El esfuerzo tangencial de trabajo a 20 °C es de 6.0 MPa aproximadamente.

- Resistencia mínima a la tracción: 19 MPa.
- Índice de fluidez menor de 0.3 g/10 min.
- Alargamiento mínimo en la rotura: 350%.

**Diámetro nominal:** El diámetro nominal es un número convencional de designación, que sirve para clasificar por dimensiones los tubos, piezas y demás elementos de las conducciones y corresponde al diámetro exterior teórico, sin tener en cuenta las tolerancias.

#### 6.1.4.2 Características hidráulicas

El pulimento y la uniformidad de la superficie cilíndrica interior de los tubos y juntas serán tales que podrán aplicarse para el cálculo de los distintos parámetros hidráulicos, ecuaciones para tubos lisos, como la de Darcy Weisbach, con una rugosidad absoluta para la tubería de 0.02 mm (tubos más juntas).

## 6.2 Emisores

### 6.2.1 Tipos de emisores y diseño propuesto

#### 6.2.1.1 Gotero

La configuración de los goteros es muy variable, pero por facilidad, se pueden agrupar en cuatro grandes grupos en función de su diseño y acabado:

- Goteros sellados: Con dos o más piezas acopladas en fábrica que no pueden separarse si no es provocando su rotura. Con ellos se consiguen los más bajos CV, cuando se obturan deben reemplazarse.
- Goteros desmontables: De dos o más piezas que pueden separarse para proceder a su limpieza manual. Tienen CV más altos que los anteriores por los problemas de ajuste en el montaje.
- Goteros en un mismo punto: Son goteros interlínea, de una sola pieza que se insertan dentro de la tubería utilizando parte de ésta como pieza exterior. Los mejores tipos vienen montados en la tubería desde fábrica. A pesar de esto suelen tener un alto CV. Son desmontables, aunque, algunas veces con dificultad.
- Goteros integrados.

Según la configuración de los conductos de paso del agua, pueden clasificarse en.

#### 6.2.1.2 De largo conducto

En ellos (Figura 6.1-D), la pérdida de carga tiene lugar en un largo conducto (de hasta 2 m de longitud) y de pequeño diámetro (de 0.5 a 2 mm). El flujo dentro del emisor es laminar, pero debido a la influencia de la entrada y salida, las fórmulas teóricas que pudieran aplicarse no se ajustan a la realidad, para ello se deben realizar pruebas y ajustes.

A este grupo pertenecen los microtubos con diámetros interiores de 0.6 mm a 2 mm, su CV puede ser bastante bueno (0.02 a 0.05), pero dependerá en gran medida del cuidado que se tenga cuando se corten a una determinada longitud.

Al grupo de emisores de largo conducto pertenecen también aquellos goteros con el conducto helicoidal, fabricados así para evitar la incomodidad que suponen los largos microtubos. Existe una amplia gama de goteros de mayor o menor tamaño y con caudales variables de 2 a 4 l/h. Su CV es muy variable, ya que existen modelos con valores de 0.02 y otros con 0.13. Sus exponentes de descarga varían de 0.65 a 0.85 y  $K_d$  entre 0.4 a 0.8.

A este grupo en particular pertenecen los emisores del RPBC, pero con algunas diferencias en sus dimensiones y formas de operar.

### 6.2.1.2 De laberinto

Pertenecen a este grupo una serie de goteros a los que se les ha llamado la segunda generación (Figura 6.1-E), con largos conductos irregulares debido a los cuales se aumenta la turbulencia del flujo, consiguiéndose valores menores de  $x$  (de 0.5 a 0.6) y menor sensibilidad a las obturaciones (secciones de paso de 1 a 2 mm) y a los cambios de temperatura. Normalmente tienen un bajo CV (menor de 0.05), pueden ser de interlínea o sobre-línea.

### 6.2.1.3 De orificio

En ellos el agua sale al exterior a través de uno o varios orificios de diámetro pequeño, en donde tiene lugar la mayor pérdida de carga (Figura 6.1-A). El régimen de flujo es completamente turbulento y el exponente de descarga  $x$  suele ser próximo a 0.5, son emisores muy sensibles a las obturaciones.

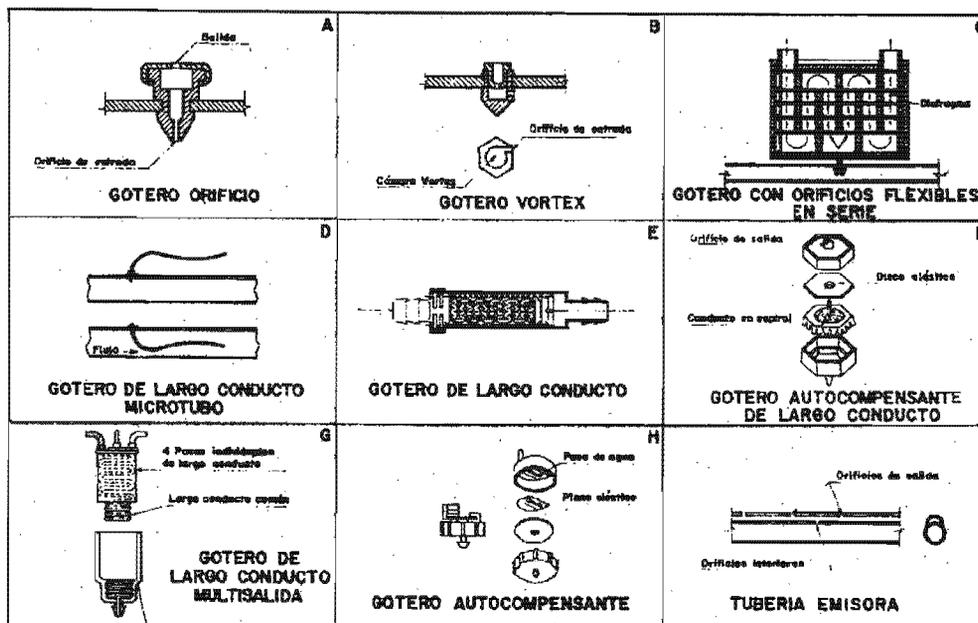


Figura 6.1. Diferentes tipos de goteros y de tuberías emisoras.

#### 6.2.1.4 Vortex

Estos goteros tienen una cámara circular en donde se produce un flujo en forma de vórtice (Figura 6.1-B). Este movimiento se consigue al entrar el agua tangencialmente a la pared circular de la cámara, como consecuencia de ello la pérdida de carga que se produce es superior que la del emisor de orificio del mismo diámetro. El CV puede ser bajo (0.04), el exponente de descarga también (de 0.4 a 0.5) y  $K_d$  es aproximadamente 1.

#### 6.2.1.5 Autocompensantes

Se trata de goteros con flujo turbulento o en transición en los que se intenta obtener un caudal constante independiente de la presión (Figuras 6.1-F y H). La autorregulación se consigue normalmente mediante una pieza móvil y flexible de caucho que se deforma bajo el efecto de la presión, disminuyendo la sección de paso del agua y limitando así el caudal.

La durabilidad de estos goteros y, sobre todo, de su membrana flexible puede verse afectada por el tiempo y la temperatura, sobre todo cuando son empleados con aguas bicarbonatadas. La sensibilidad a las obturaciones puede llegar a ser grande, ya que cuando la presión aumenta disminuye la sección de paso, pudiendo llegar a valores inferiores a 0.5 mm.

Su defecto mayor puede ser el alto valor de CV, debido a la existencia de piezas móviles. El efecto autorregulante no se consigue sino a partir de una determinada presión que deberá indicar el fabricante, existiendo también una presión máxima a partir de la cual el emisor deja de funcionar correctamente. El límite inferior suele estar en los 10 m y el superior en los 30 a 40 m (intervalo de autocompensación).

#### 6.2.1.6 Autolimpiantes

Existen fundamentalmente dos tipos de goteros autolimpiantes: los que pueden estar o no en posición limpiante y los que continuamente lo estén.

Los primeros sólo se limpian durante el corto tiempo que tarda el sistema en ponerse en funcionamiento y alcanzar la presión de régimen, o en pararse y pasar de ésta a la presión atmosférica.

Los segundos (Figura 6.1-C), de limpieza continua, están fabricados para que partículas relativamente grandes sean expulsadas durante su funcionamiento. Esto se consigue mediante una serie de orificios flexibles que disipan la presión y que son deformables cuando una partícula de mayor tamaño que el orificio llega a él, consigue pasar, deformándolo, a causa de la diferencia de presión que se crea entre las dos cámaras que comunican al orificio.

Con los del primer tipo debe tenerse la precaución de que la capacidad del sistema en caudal sea suficiente para poder llegar a la presión de régimen, ya que descargan más caudal cuando están en la posición de limpieza. Por otra parte, la pieza móvil (generalmente una esfera), que suele servir para efectuar estos cambios de funcionamiento, obliga a que el

gotero esté perfectamente en vertical y a pesar de ello suele llegar a bloquearse. Estos inconvenientes han hecho que hoy en día están prácticamente en desuso.

En los segundos las deformaciones y desgastes que se producen en los orificios flexibles hacen que al poco tiempo de uso los caudales producidos varíen considerablemente.

Existe un tercer grupo en los que a la entrada del emisor va situada una rejilla que opera como filtro para evitar la entrada de partículas en el cuerpo del emisor; el exponente de descarga de los de limpieza continua es de 0.7 y el CV varía de 0.05 a 0.07.

#### **6.2.1.7 Sistemas integrados**

En estos sistemas, los goteros convencionales se sitúan en el interior de las tuberías, en el mismo proceso de fabricación, sin que exista ningún tipo de acoples o juntas. En algunos casos se trata de goteros tipo largo conducto o laberinto, actuando como tal la propia tubería. En otros se trata de goteros autocompensantes, etc. El caudal de los emisores suele ser inferior a 4 l/h.

Basándose en ese caudal, en la tolerancia de presiones y el diámetro, la tubería lateral tendrá longitudes muy variables que en el caso más favorable pueden llegar a tener hasta 300 m.

Estos sistemas integrados, al igual que las tuberías emisoras, se diseñan para reducir costos en los cultivos que requieren una gran cantidad de goteros. La duración de estos sistemas es variable, en función de la calidad de la tubería.

El diámetro de la tubería es normalmente inferior a 25 mm. Los intervalos a que se sitúan los emisores son variables según sean las necesidades. Los tipos más usuales ofrecen amplias gamas de espaciado, entre 0.30 y 1.50 m. La presión de trabajo depende del tipo de emisor; en general, necesitan presiones mínimas del orden de 0.3 - 0.5 atmósferas (3.1 - 5.1 m), y máximas entre 3 y 4 atmósferas (31 a 41.3 m).

En riego subterráneo existen goteros con herbicida incorporado de emisión lenta para evitar la entrada de raíces en ellos.

#### **6.2.1.8 Tuberías emisoras**

Se emplean, por su bajo costo, en cultivos de tamaño de plantación muy estrechos que requerirían una gran densidad de goteros. En general, son bastante sensibles a las obturaciones ya que cuentan generalmente con orificios de salida de diámetro inferior a 1 mm. Trabajan a presiones inferiores a los 10 m con exponentes de descarga que varían ente 0.4 a 0.8 y CV desde 0.10 a 0.20 o más.

Están, frecuentemente, fabricadas a base de PE, de espesor variable, por lo que convendrá cerciorarse de que su precio este relacionado con su vida útil. En términos generales, estas tuberías deben colocarse enterradas a poca profundidad.

### 6.2.2 Reguladores de presión y gasto

Los reguladores son aparatos que absorben el exceso de energía de la red, proporcionando un valor constante de presión o caudal de agua. El principio de funcionamiento es crear una pérdida de carga adicional como medio de controlar la presión o caudal en la red. A su vez, al estar la presión y el caudal directamente relacionados para un diámetro dado de tubería, se logra una regulación de caudales o presiones. Los reguladores se pueden clasificar como sigue:

- **Reguladores de gasto:** Mantienen un caudal aproximadamente constante dentro de un determinado rango de presiones de entrada. La presión de salida depende de las características hidráulicas de la red de riego aguas abajo del aparato.
- **Reguladores de presión:** Mantienen una presión de salida aproximadamente constante dentro de un determinado rango de presiones de entrada. El caudal depende de las características hidráulicas de la red de riego, aguas abajo del aparato. Los reguladores de presión pueden ser de dos tipos: reguladores de presión dinámica que actúan sólo con flujo de agua y los reguladores de presión estática y dinámica los cuales trabajan con y sin flujo de agua.

Algunos reguladores de gasto se muestran en la figura (6.2) más utilizados en sistemas convencionales de riego por goteo.

Se acuerdo con lo observado tanto en la experimentación y con los resultados obtenidos, se propone a continuación un diseño.

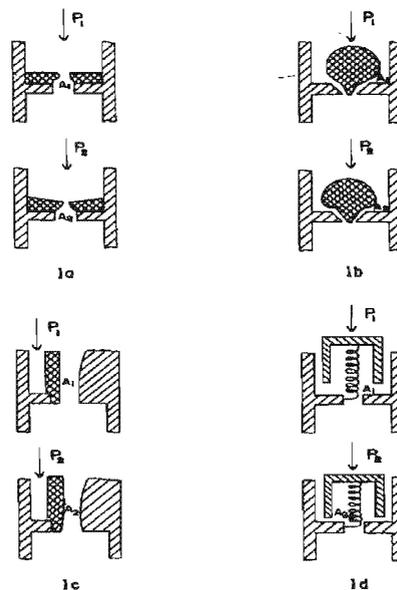


Figura 6.2. Reguladores de caudal más utilizados en sistemas convencionales de riego por goteo.

En las gráficas de las Figuras 6.3 y 6.4 se muestra el comportamiento de los emisores de corto y largo conducto utilizados en el RPBC. Ahí se pueden observar las superficies de respuesta obtenidas experimentalmente para nueve diferentes diámetros y para seis gastos, en los rangos prácticos de diseño.

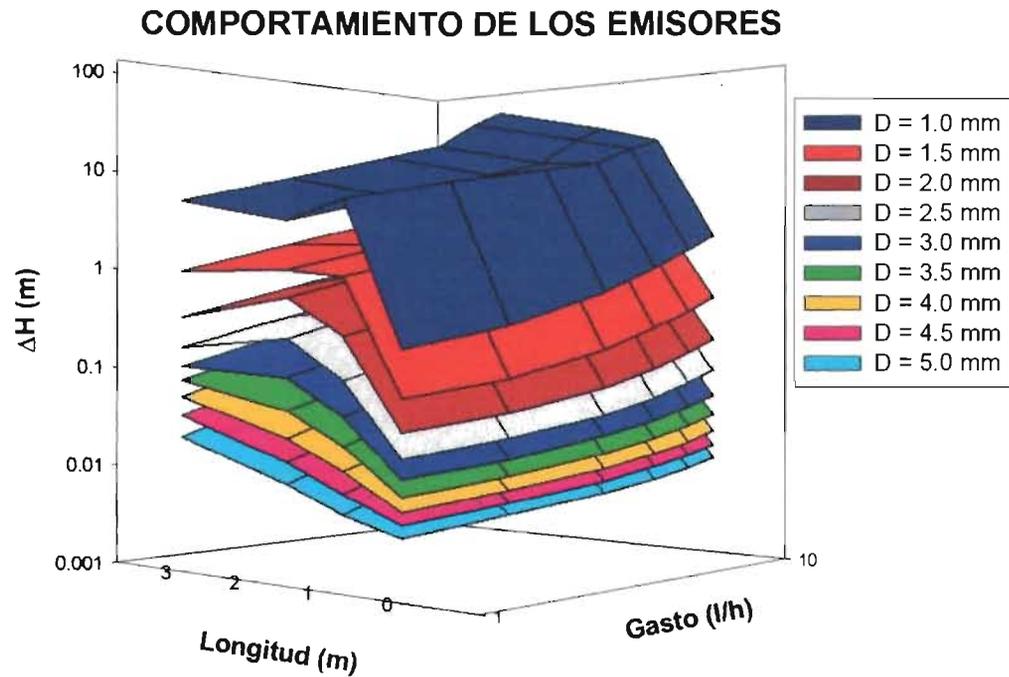


Figura 6.3. Comportamiento de los emisores variando el diámetro.

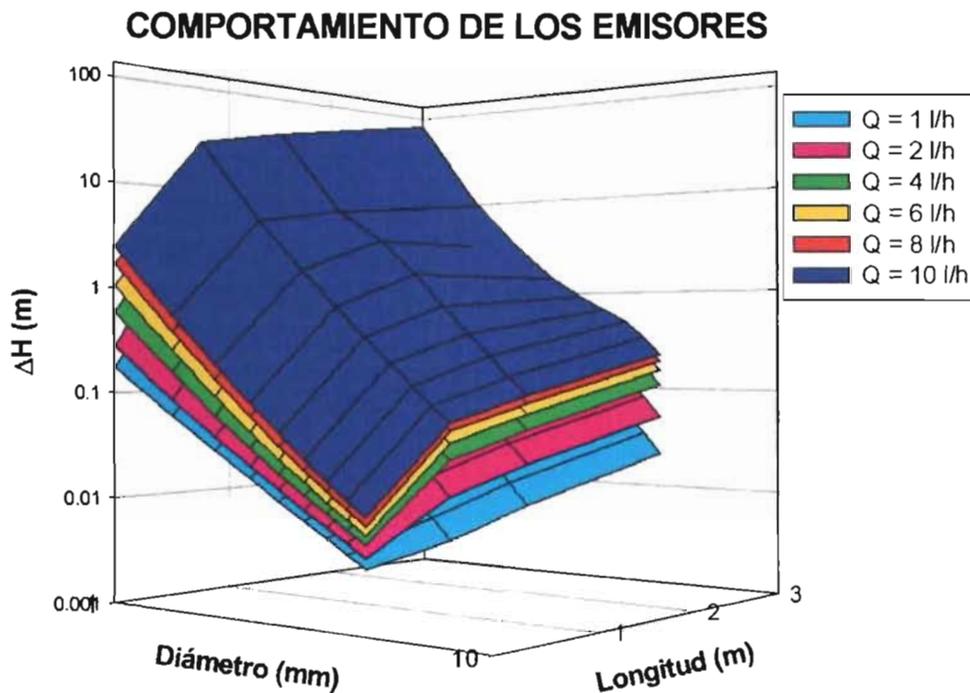


Figura 6.4. Comportamiento de los emisores variando el gasto.

### 6.2.2 Gráficas de diseño

A continuación se presentan las gráficas de diseño para dos casos:

1. Pérdidas de carga despreciables en la lateral y
2. Pérdidas combinadas lateral-emisor

#### 6.2.2.1 Pérdidas de carga despreciables en la lateral

Si se utilizan laterales de no más de 50 m de longitud y diámetros mayores de 3/4", para gastos por emisor menores de 8 L/h, las pérdidas de carga en la lateral son despreciables y los gastos dependerán de la carga y del diámetro y longitud del emisor. En las Figs.6.5 a 6.9 están las gráficas de diseño que permiten determinar la longitud adecuada para emisores de cierto diámetro bajo una carga dada, o cualquier combinación de las variables anteriores.

Como se podrá observar existe un amplio rango de soluciones, ya que hay una variación en los diámetros de 1.0 mm hasta 5.0 mm, que fue el rango que se experimentó en el presente trabajo, y una variación de longitud, desde 0.01 m hasta 3 m. Con referencia al gasto, como ya se mencionó en las características del sistema de riego por goteo, se consideró tomar un rango de variación de 1 l/h a 10 l/h. Una observación importante que se puede hacer es que el rango de la carga necesaria para que funcione el emisor, para los gastos anteriores es muy pequeña.

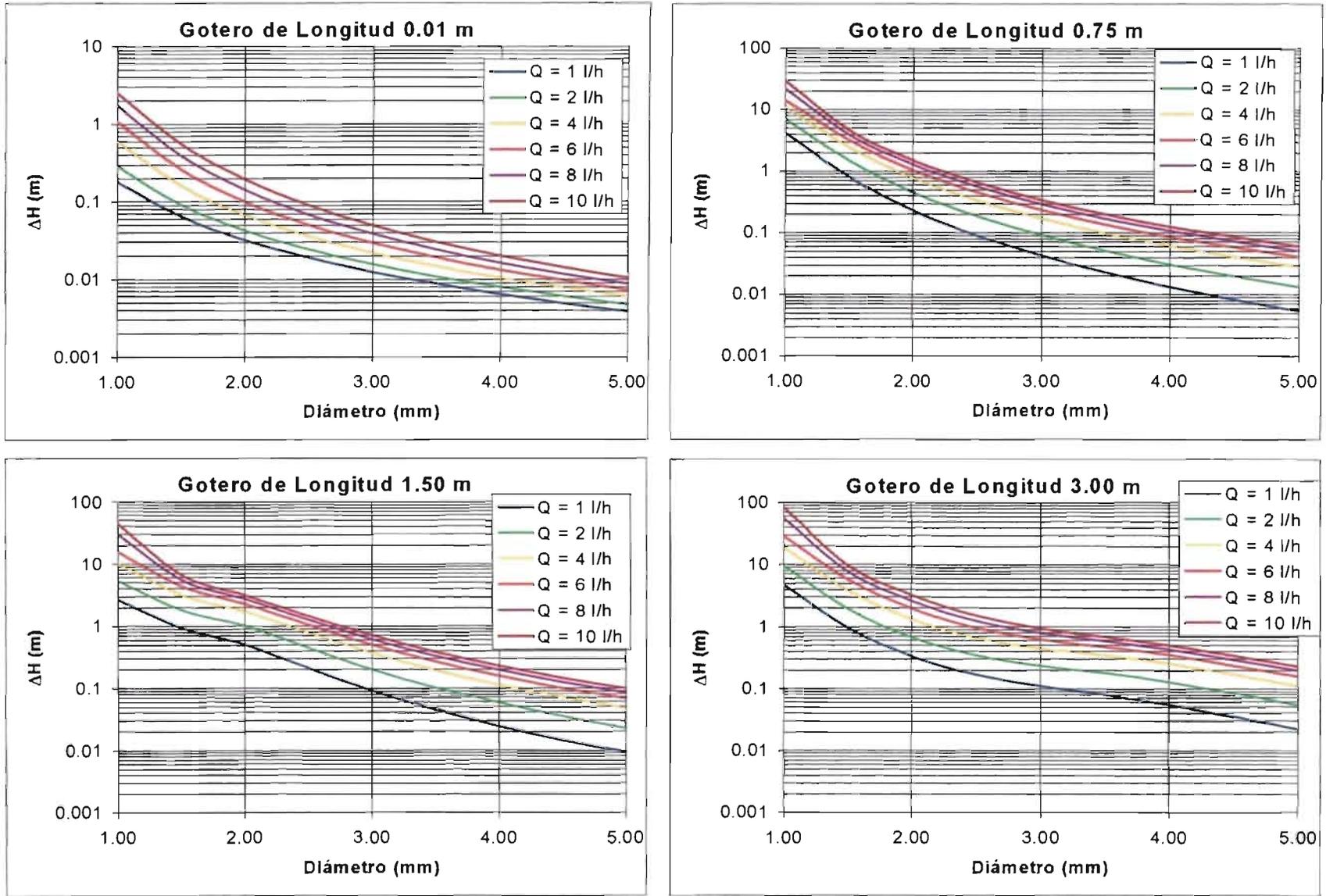


Figura 6.5. Gráficas de diseño del emisor, variando el gasto.

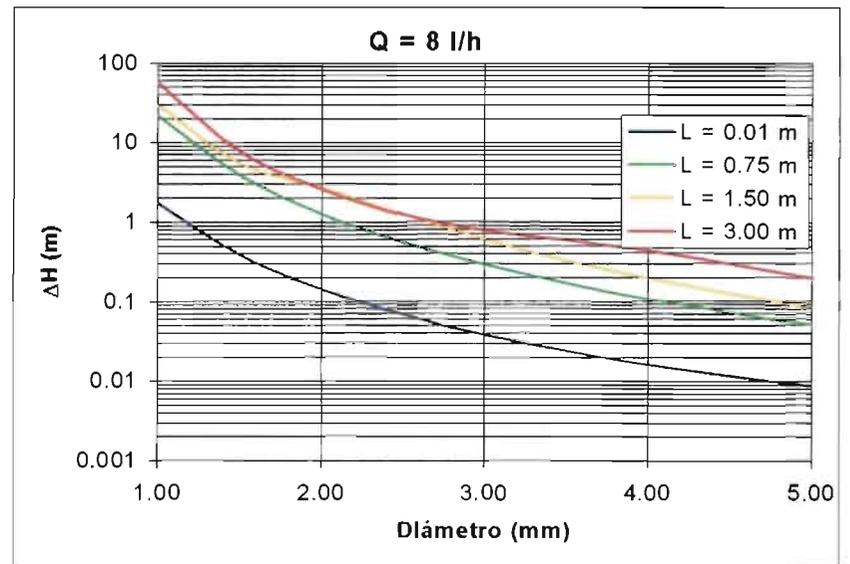
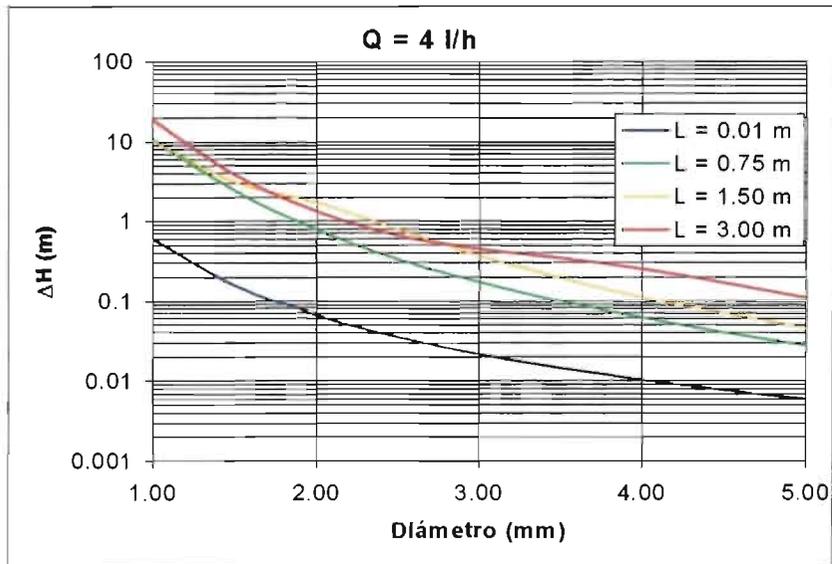
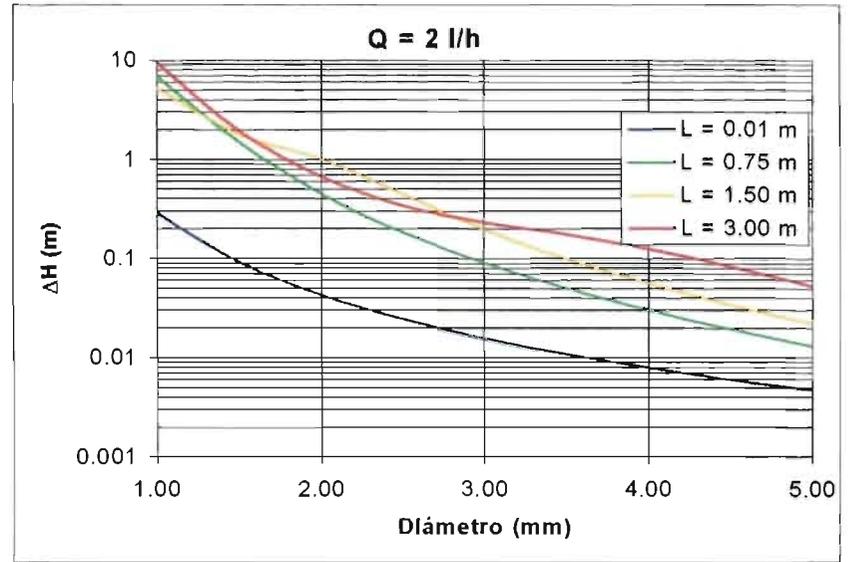
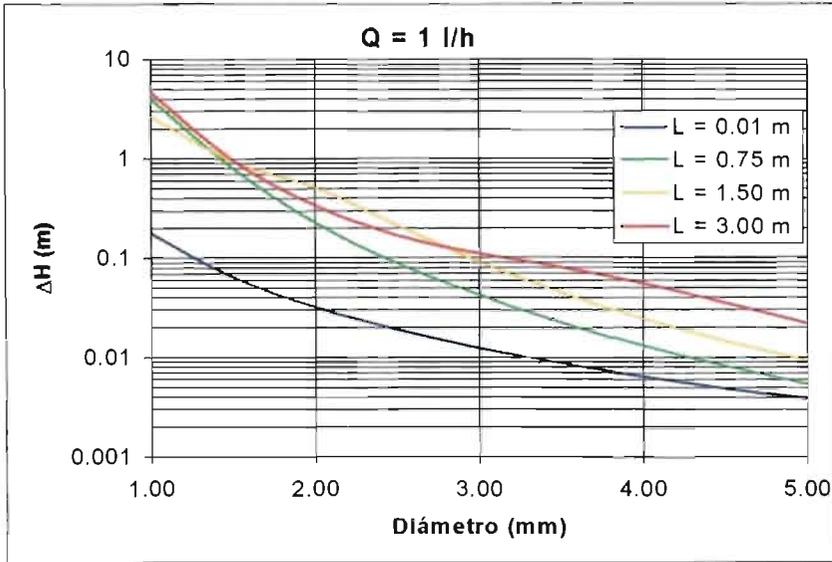


Figura 6.6. Gráficas de diseño del emisor, variando la longitud.

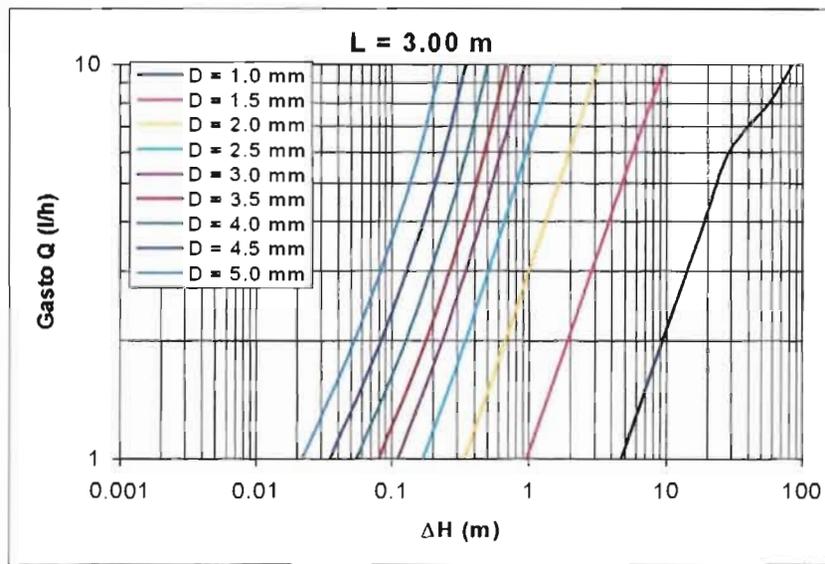
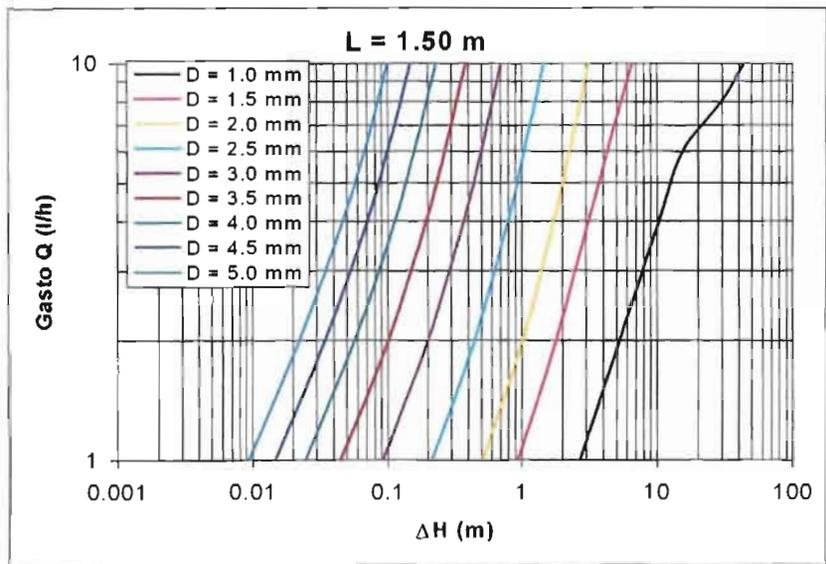
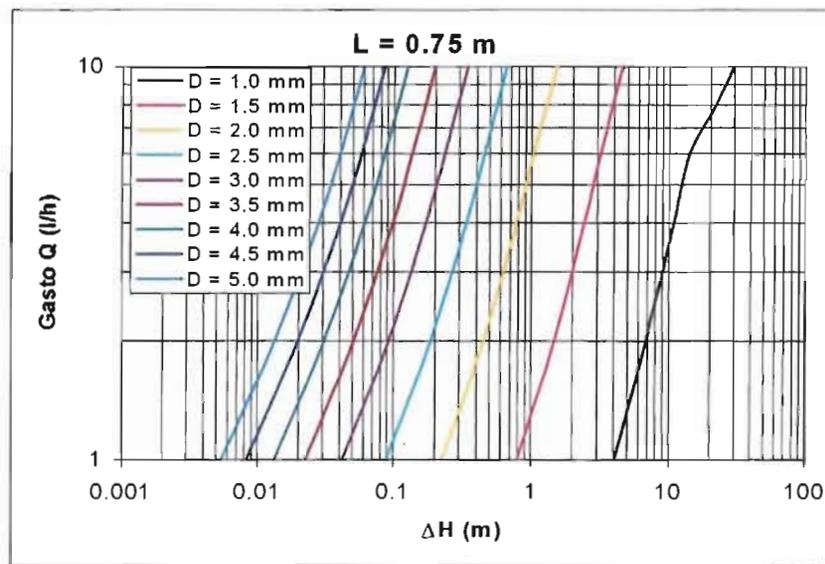
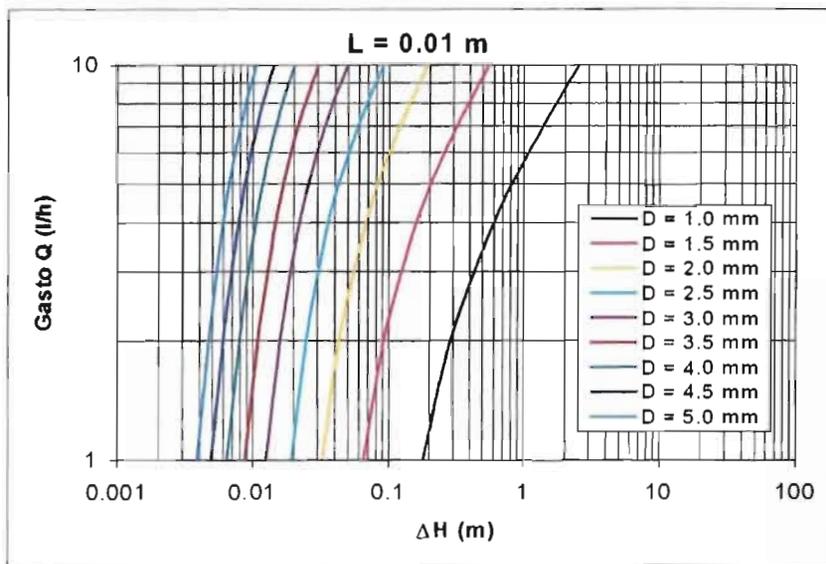


Figura 6.7. Gráficas de diseño del emisor, variando el diámetro.

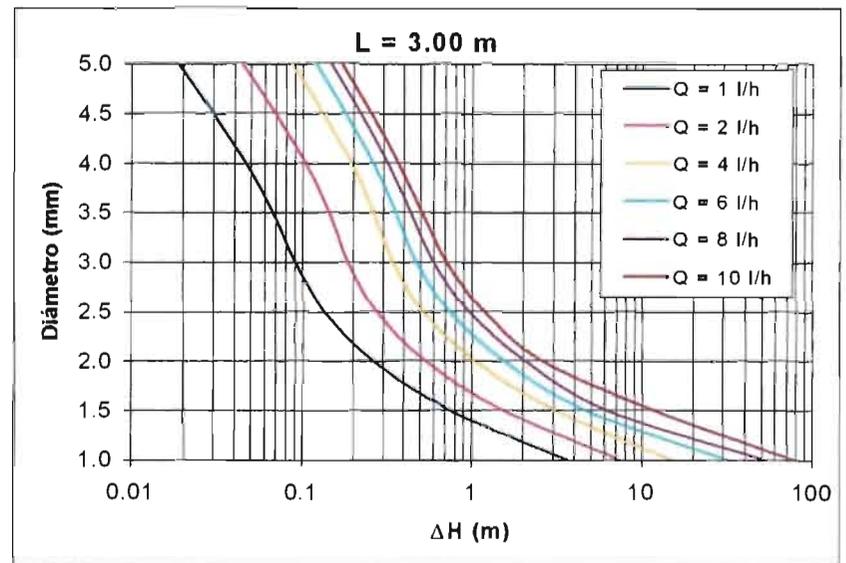
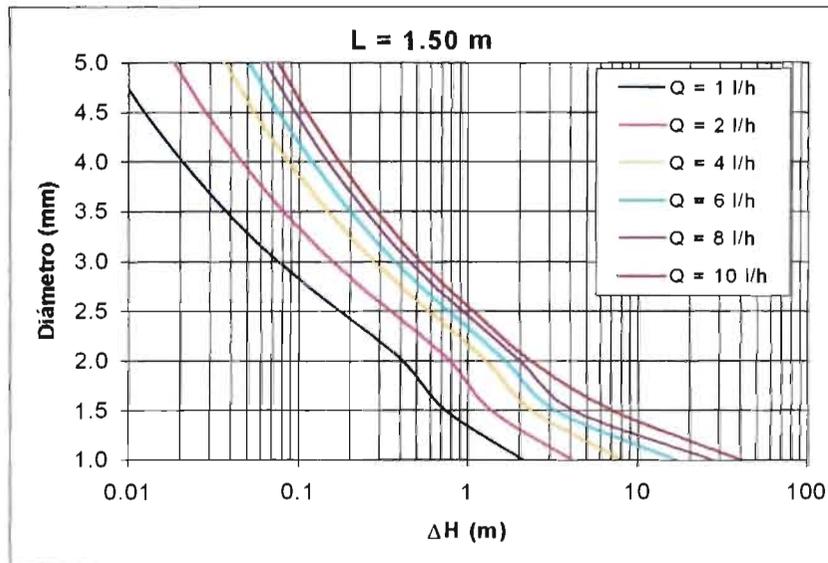
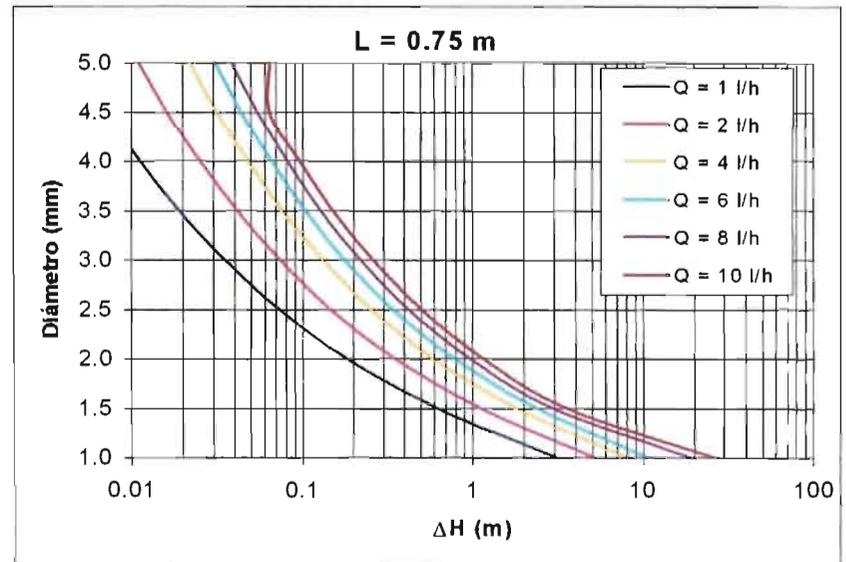
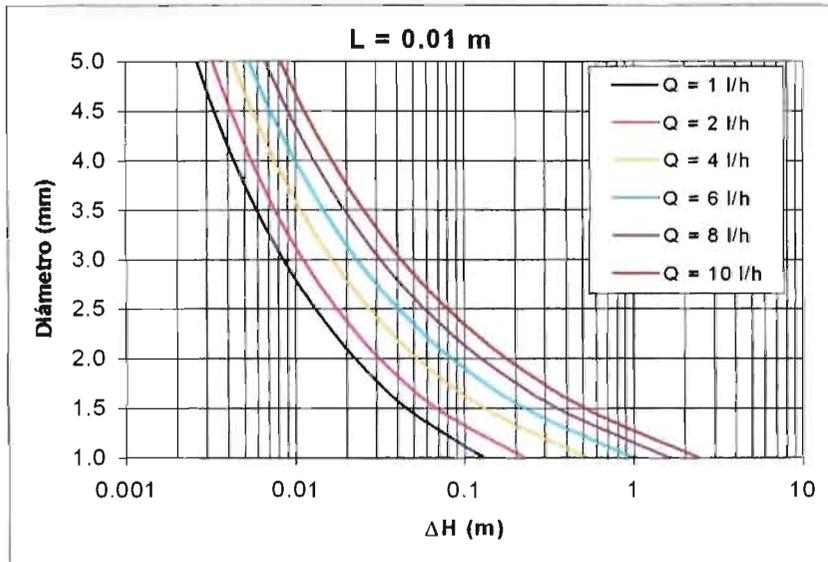


Figura 6.8. Gráficas de diseño del emisor, variando el gasto.

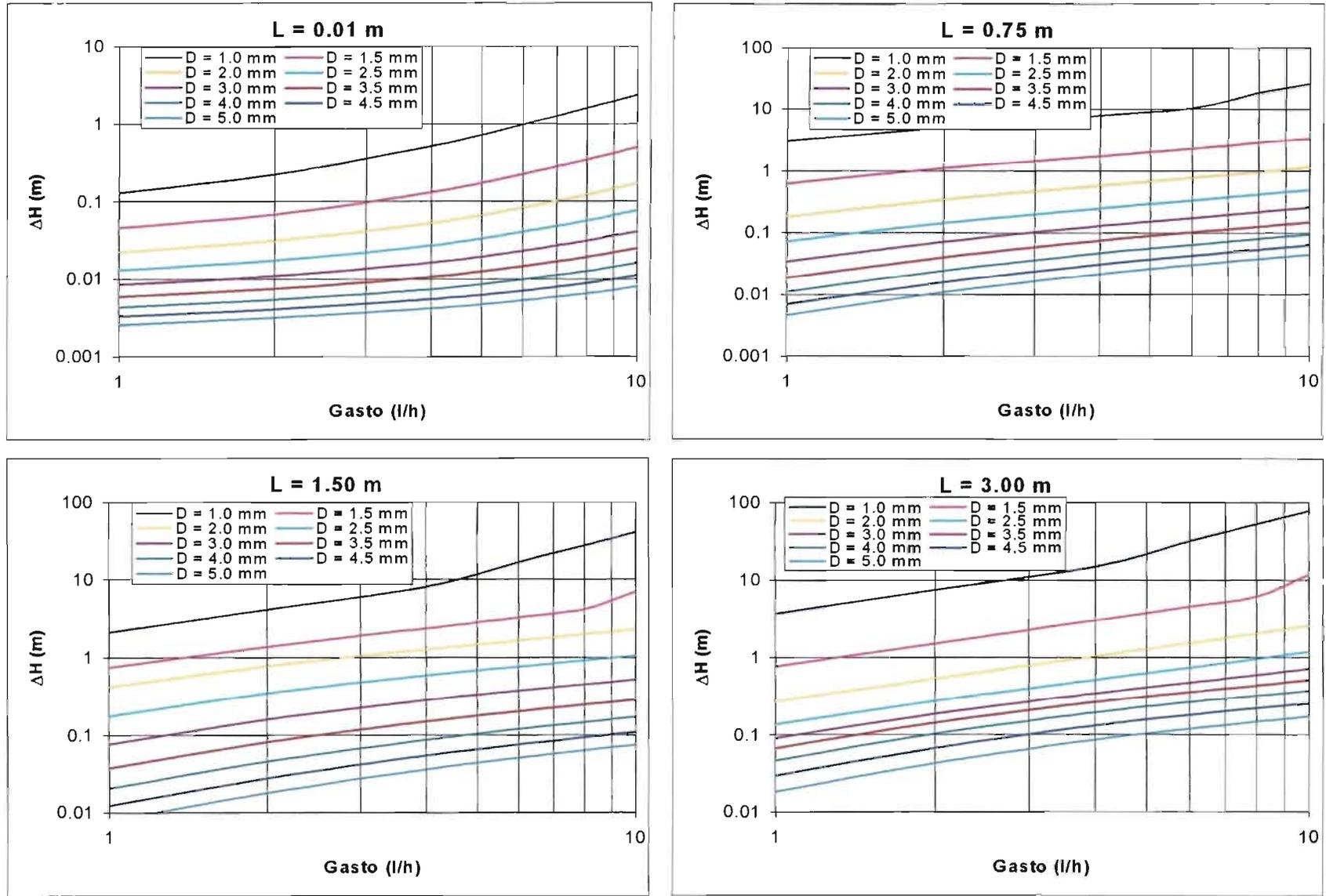


Figura 6.9. Gráficas de diseño del emisor, variando el diámetro.

### 6.3 Gráficas de diseño, combinadas lateral-emisor

A continuación se presentan las gráficas de diseño en las figuras 6.10 a 6.57 que se pueden utilizar para un uso práctico en campo, teniendo en cuenta las siguientes características: la lateral tiene una longitud de 50 m, con diámetros desde ½" a 2". La separación de los emisores varió entre los 0.5 m y los 2 m. Gastos por emisor de 2 l/h a 8 l/h. La longitud del emisor varia de 0.01 m a 1.00 m y, finalmente, el diámetro del emisor varió de 1.26 mm a 4.76 mm.

Las gráficas toman en cuenta tanto la pérdida a lo largo de la lateral como la pérdida producida por el emisor, utilizando las ecuaciones obtenidas en el capítulo 5, por lo que se pueden utilizar para ver cual es la solución más óptima, tanto en reducir las pérdidas como el tiempo de riego.

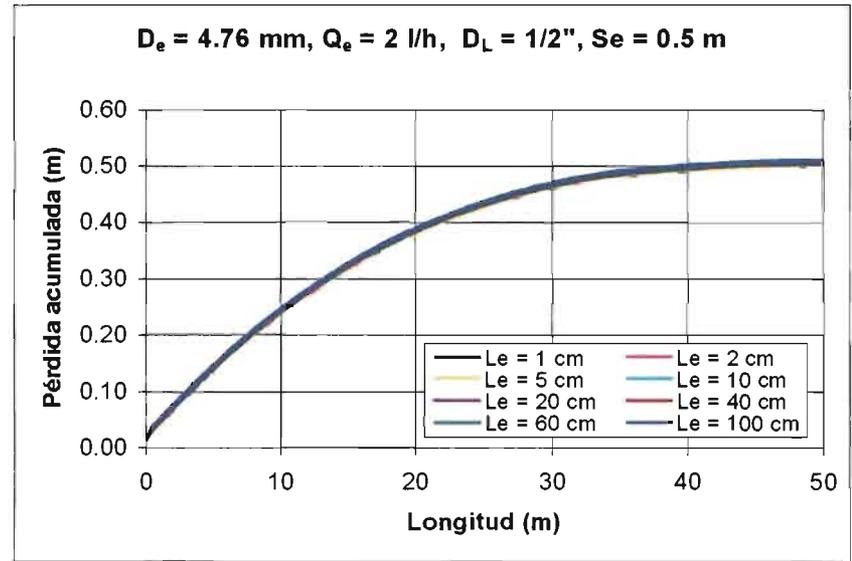
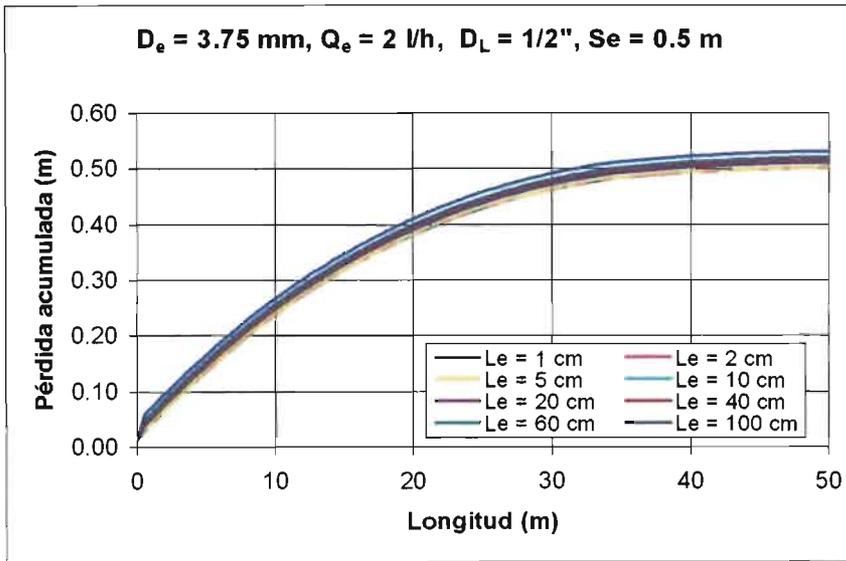
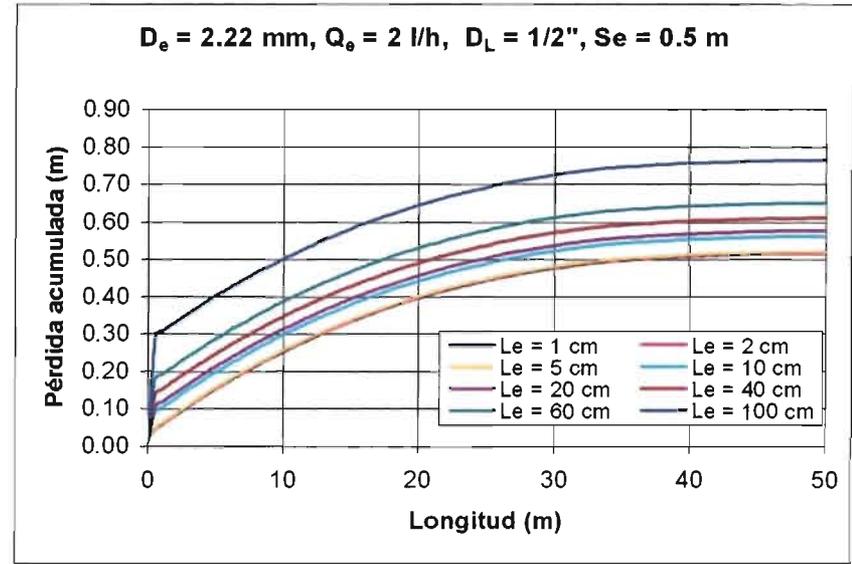
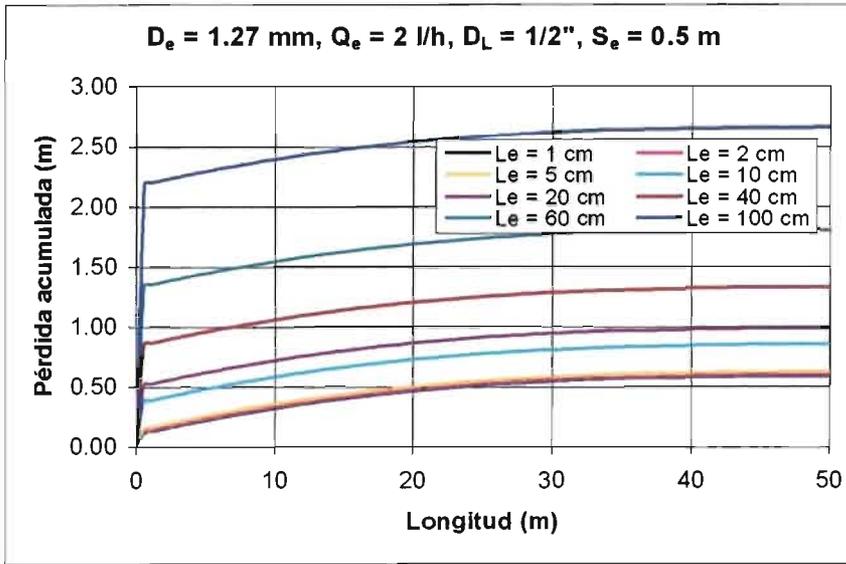


Figura 6.10. Gráficas del lateral, diámetro 1/2", separación de 0.5 m y gasto 2 L/h.

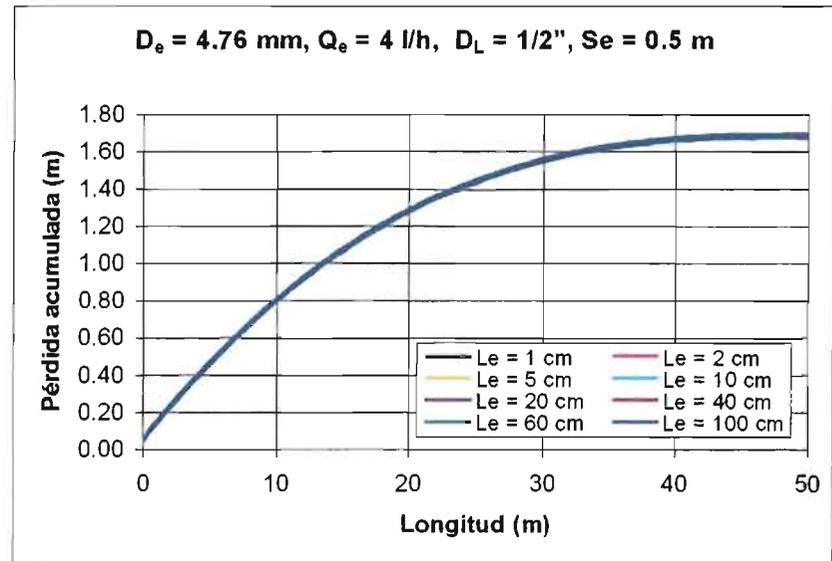
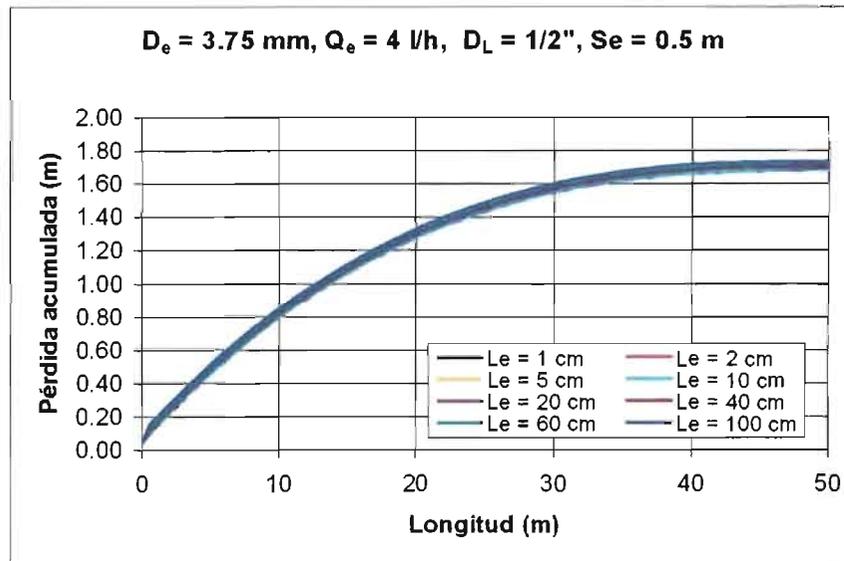
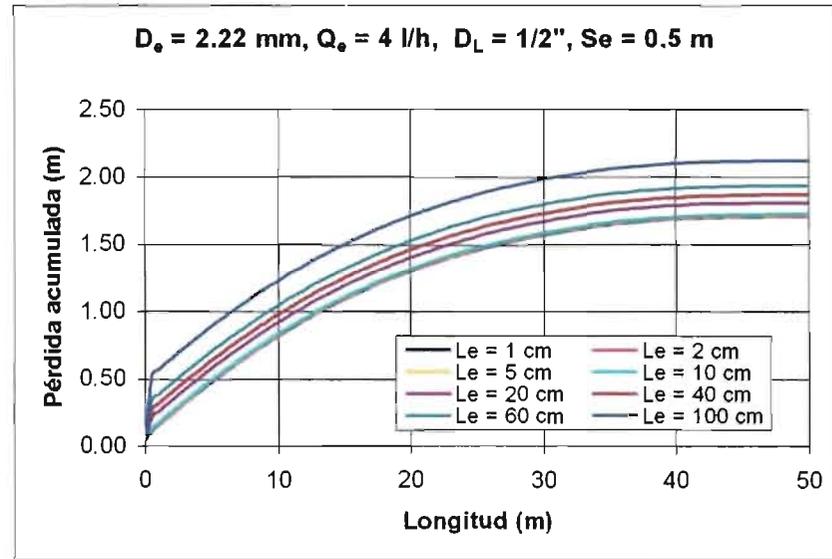
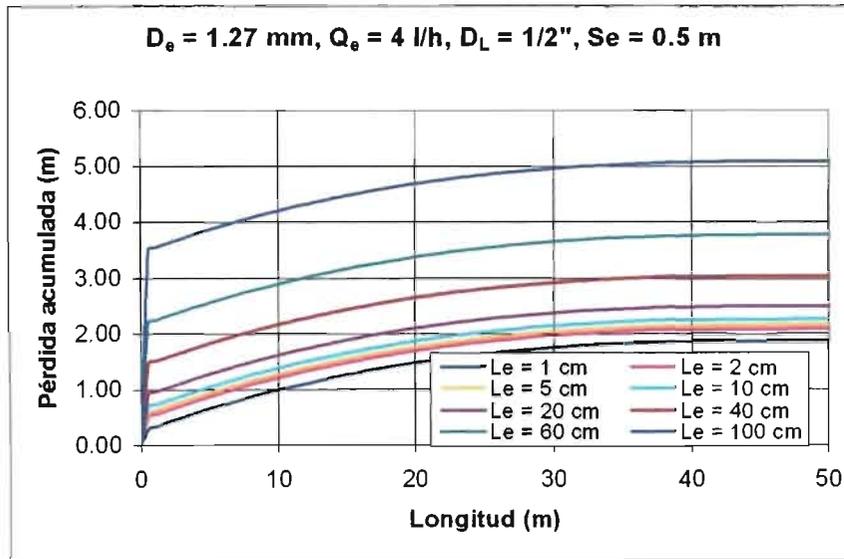


Figura 6.11. Gráficas del lateral, diámetro  $1/2''$ , separación de 0.5 m y gasto 4 L/h

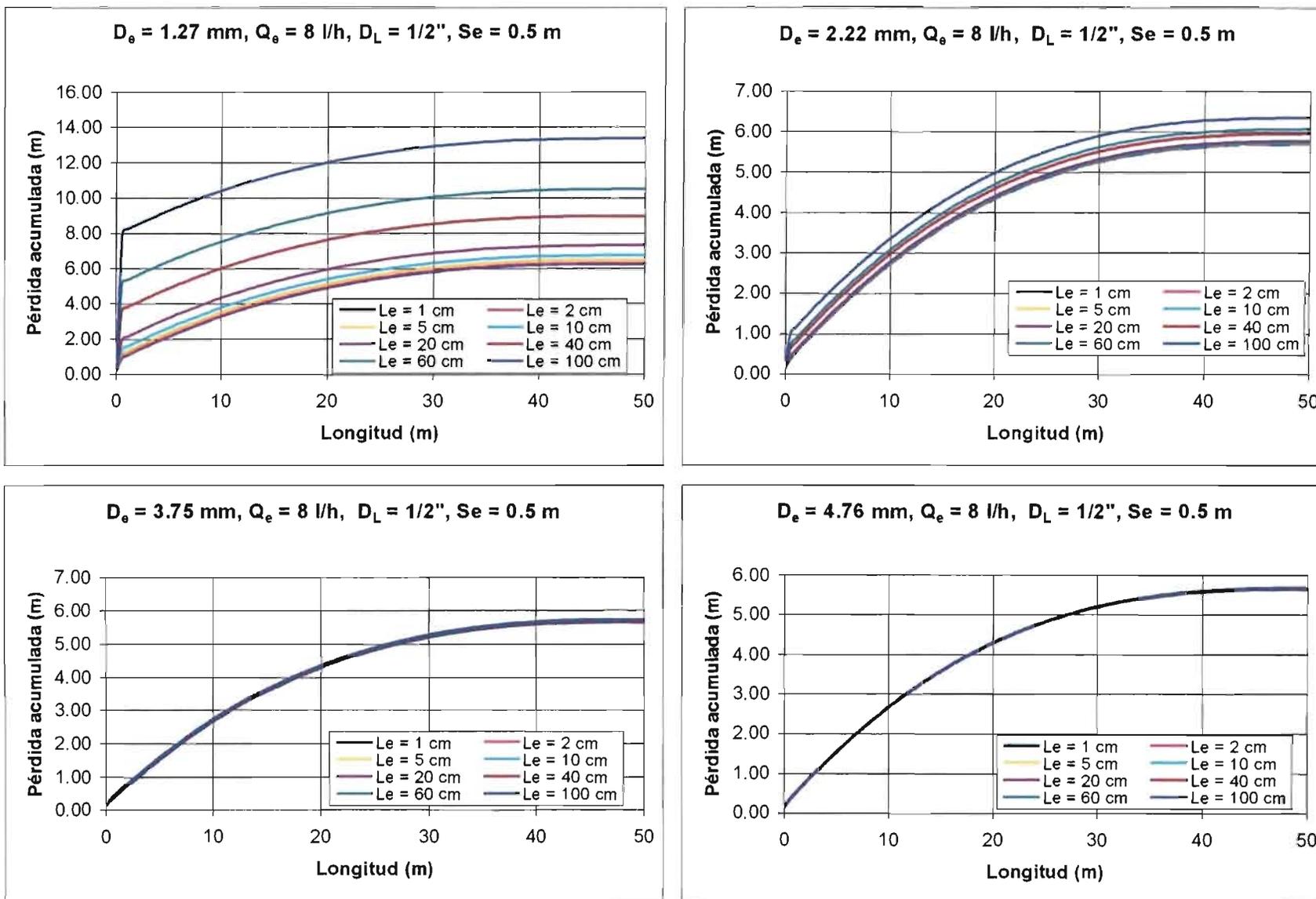


Figura 6.12. Gráficas del lateral, diámetro  $1/2''$ , separación de 0.5 m y gasto 8 L/h.

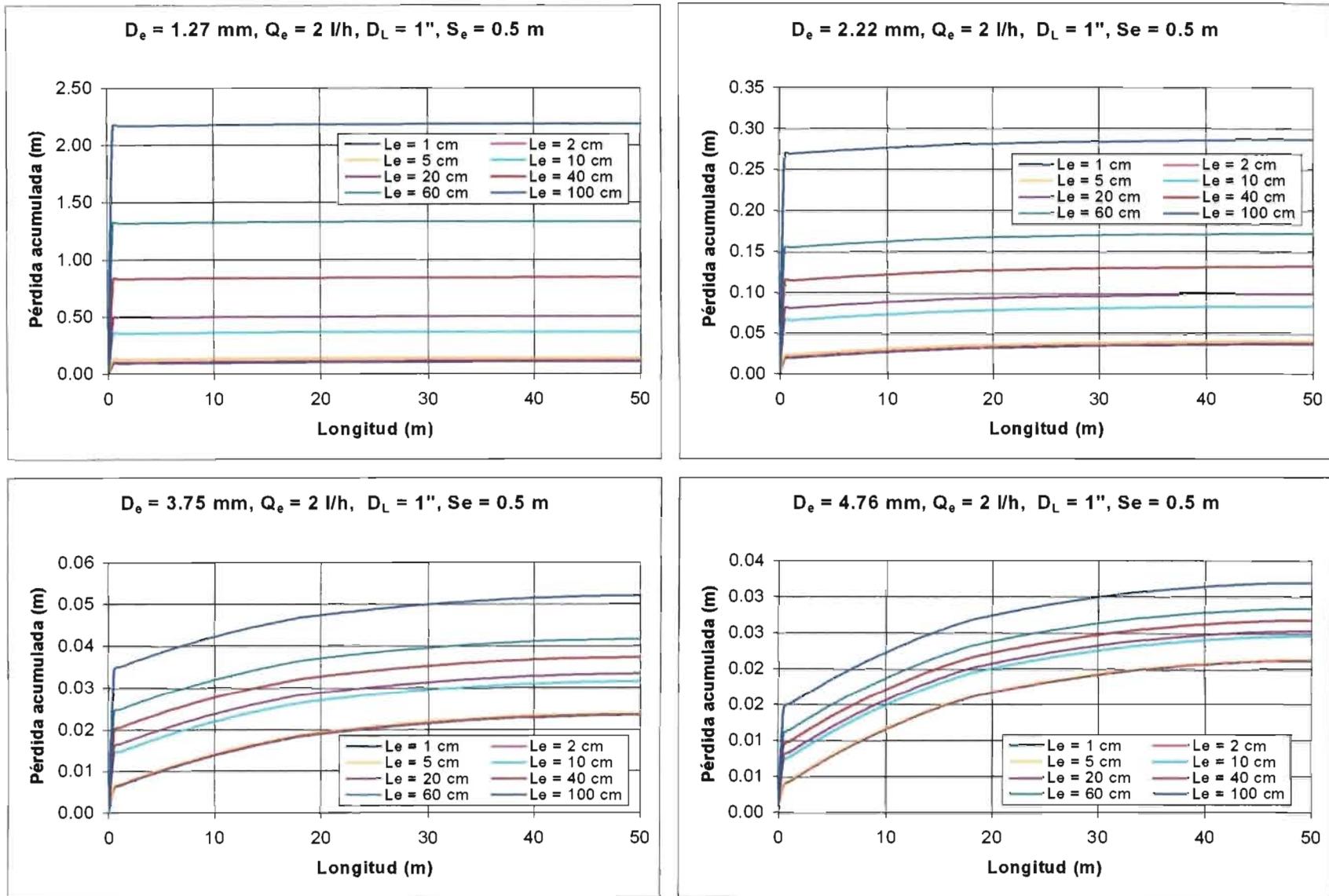


Figura 6.13. Gráficas del lateral, diámetro 1'', separación de 0.5 m y gasto 2 L/h.

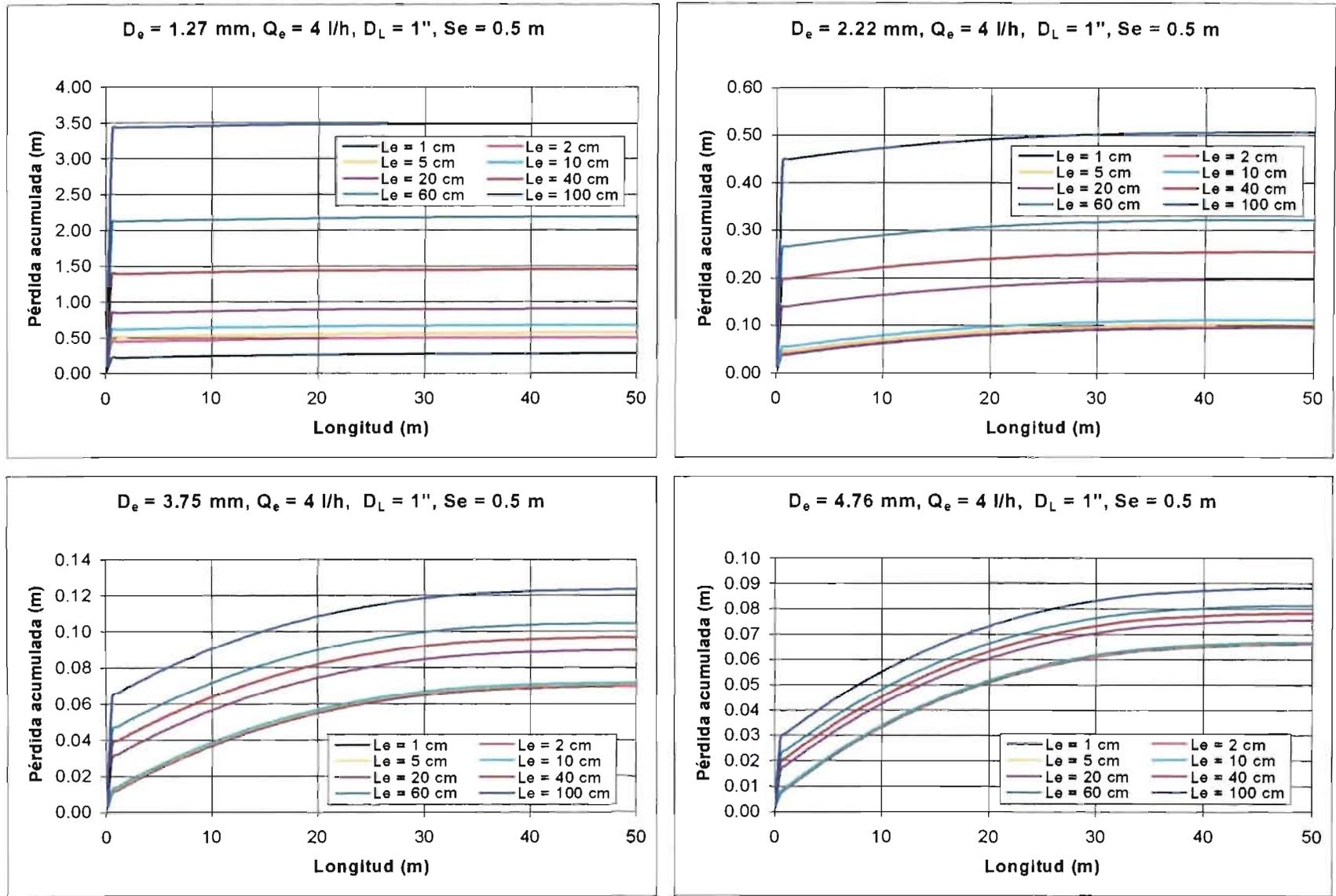


Figura 6.14. Gráficas del lateral, diámetro 1", separación de 0.5 m y gasto 4 L/h.

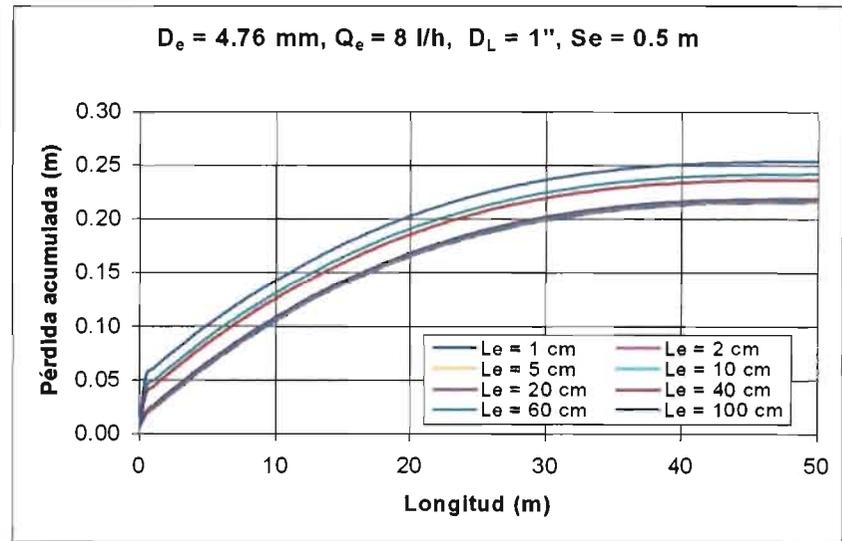
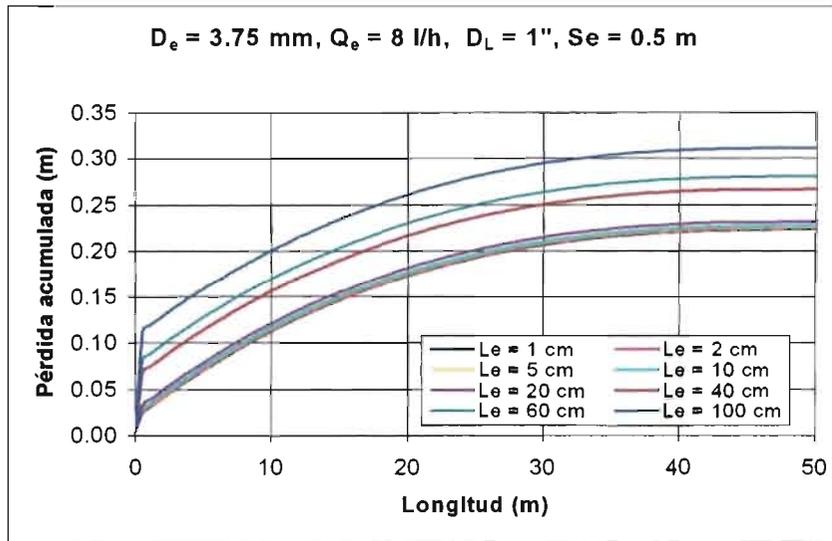
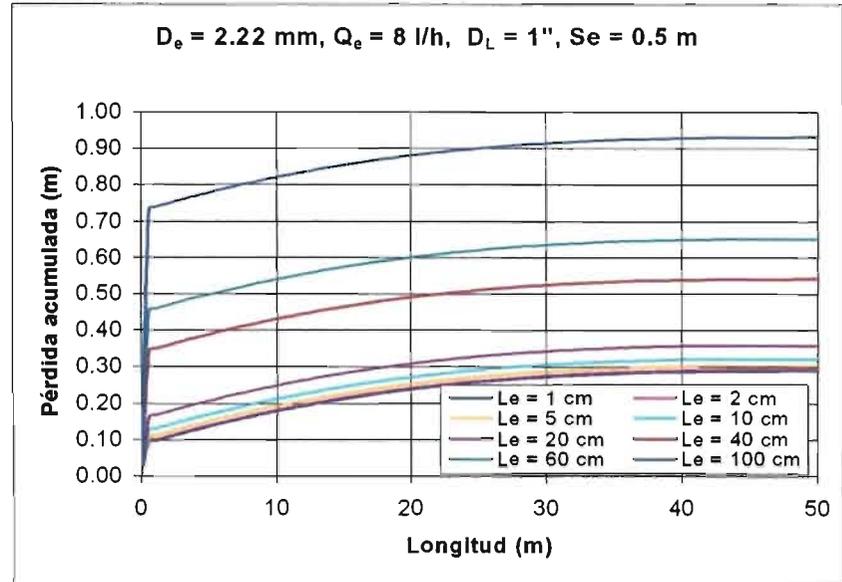
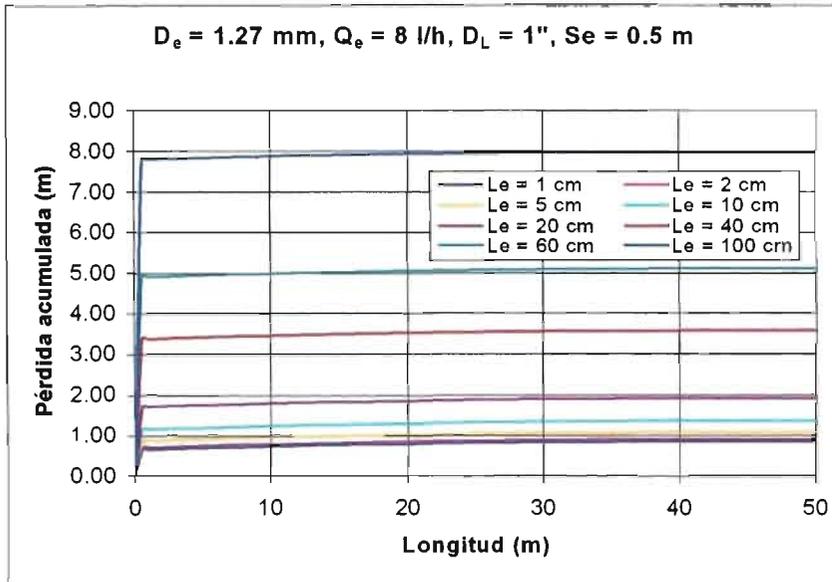


Figura 6.15. Gráficas del lateral, diámetro 1", separación de 0.5 m y gasto 8 L/h.

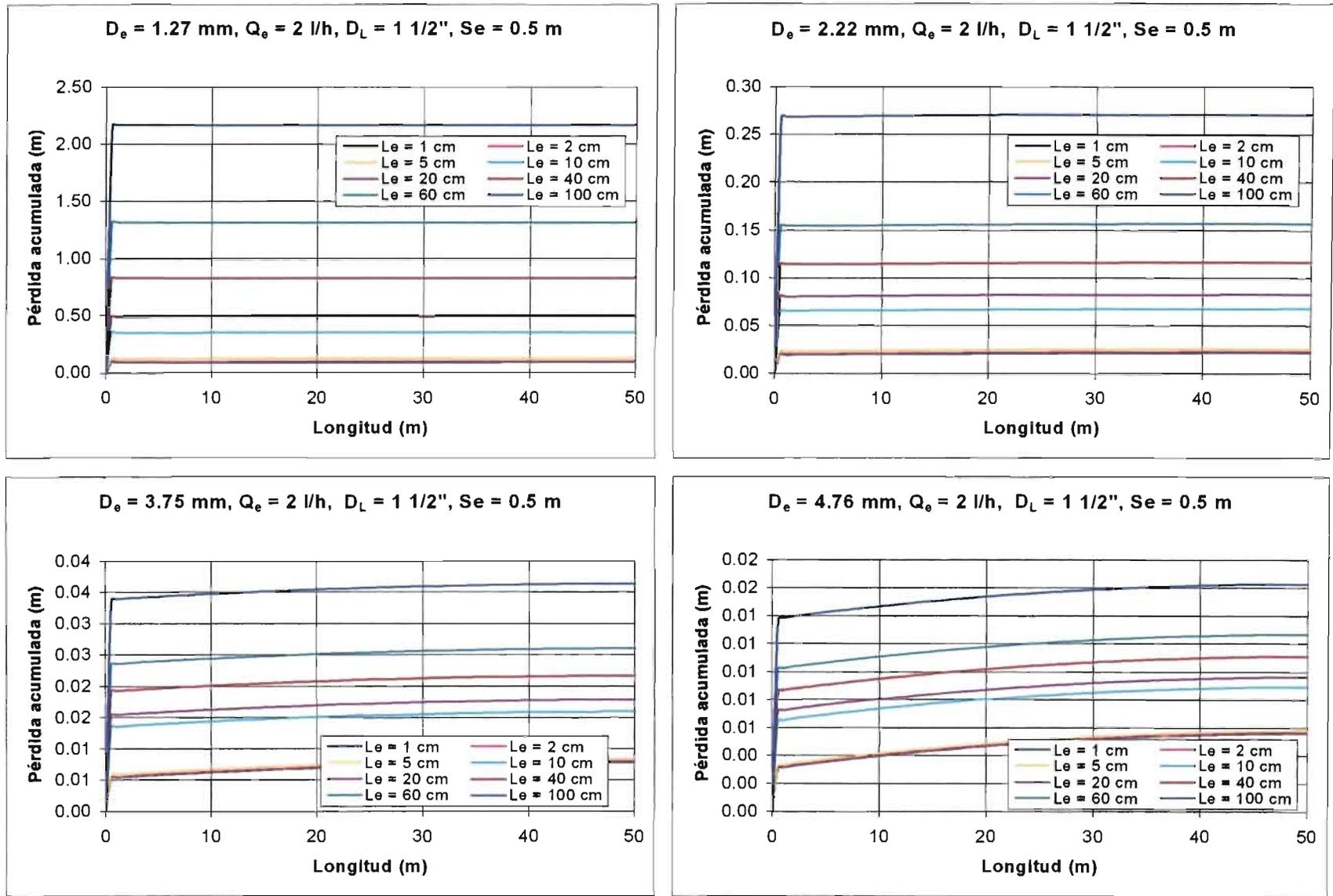


Figura 6.16. Gráficas del lateral, diámetro 1 1/2", separación de 0.5 m y gasto 2 L/h.

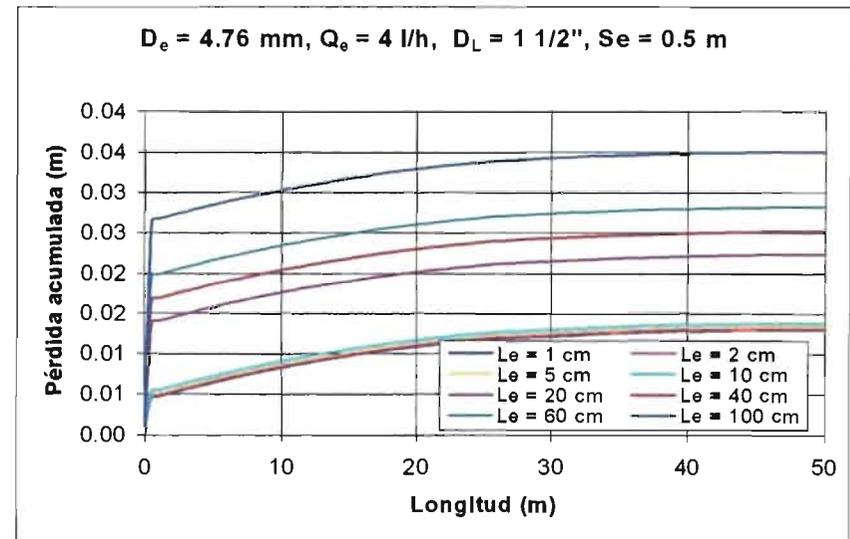
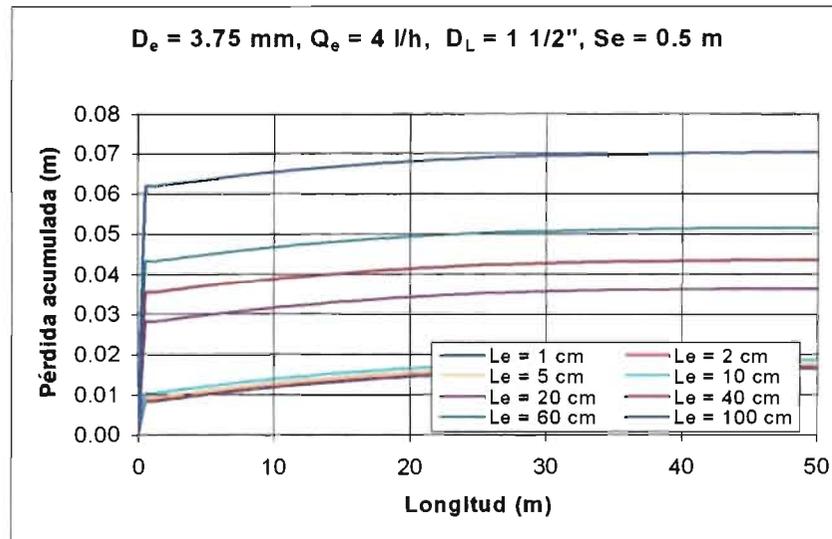
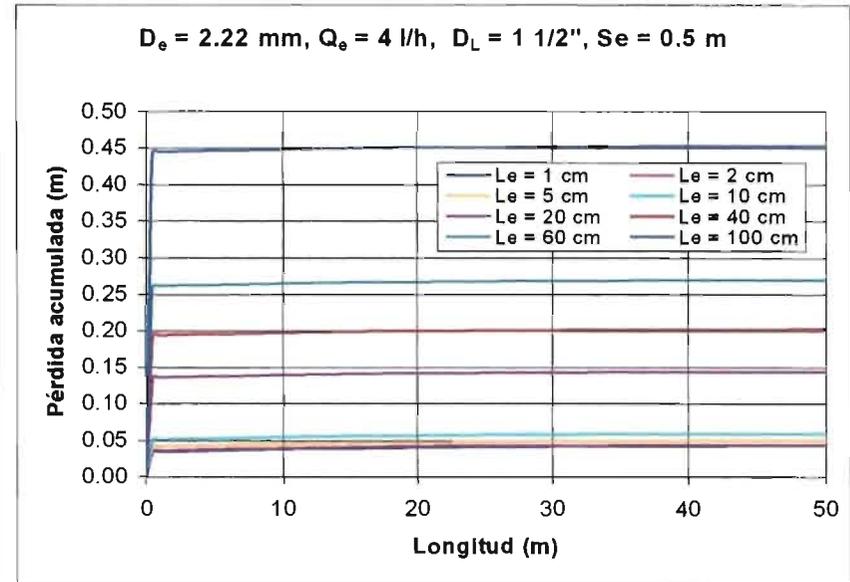
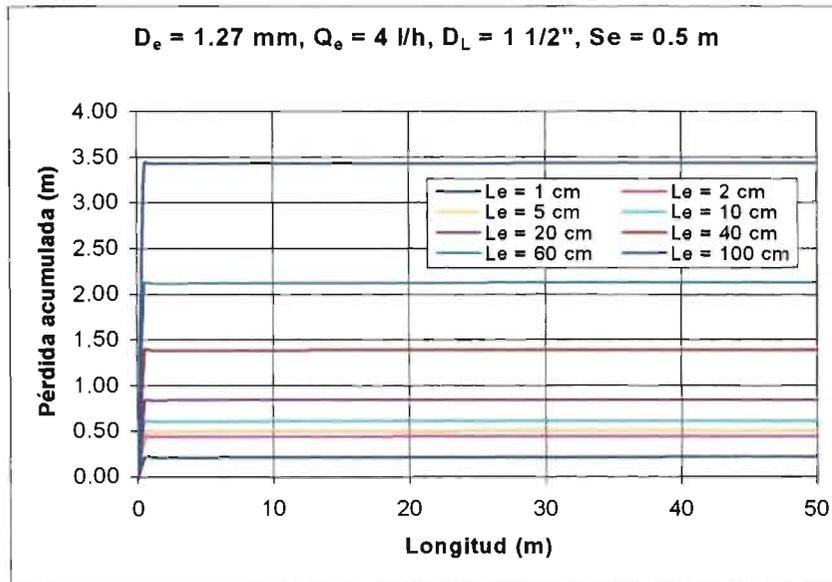


Figura 6.17. Gráficas del lateral, diámetro 1 1/2", separación de 0.5 m y gasto 4 L/h

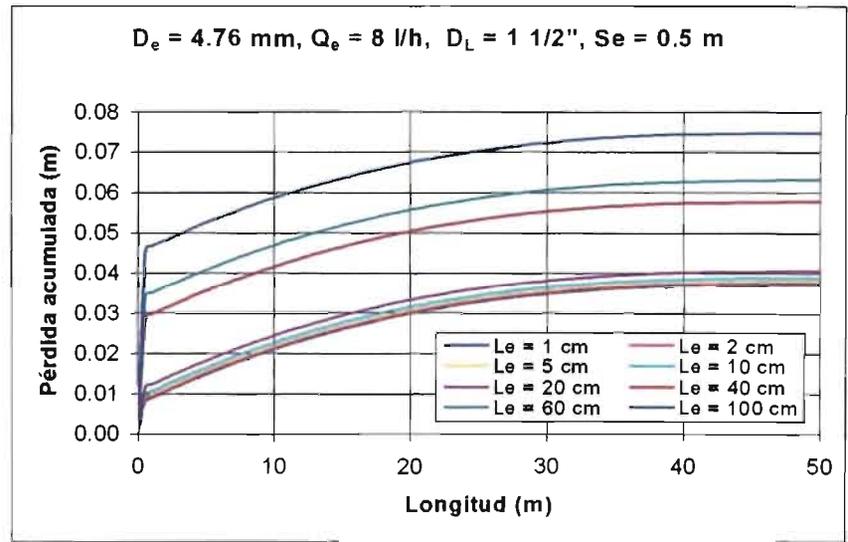
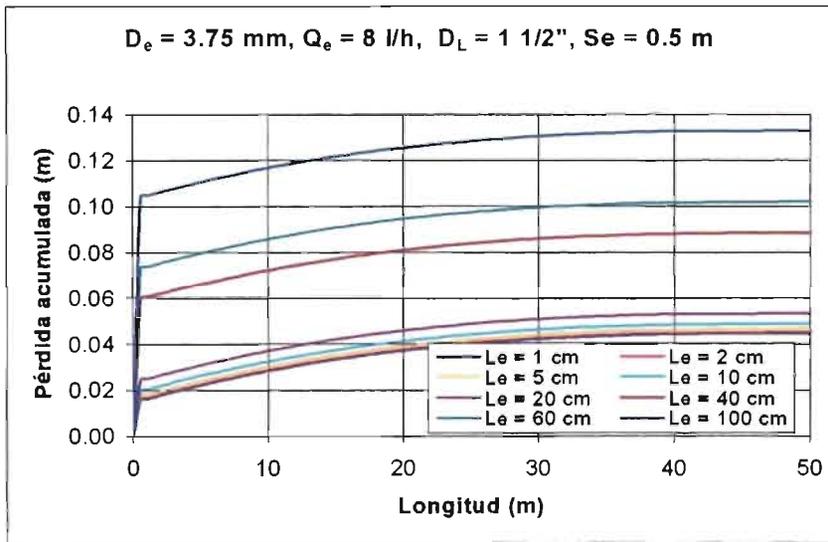
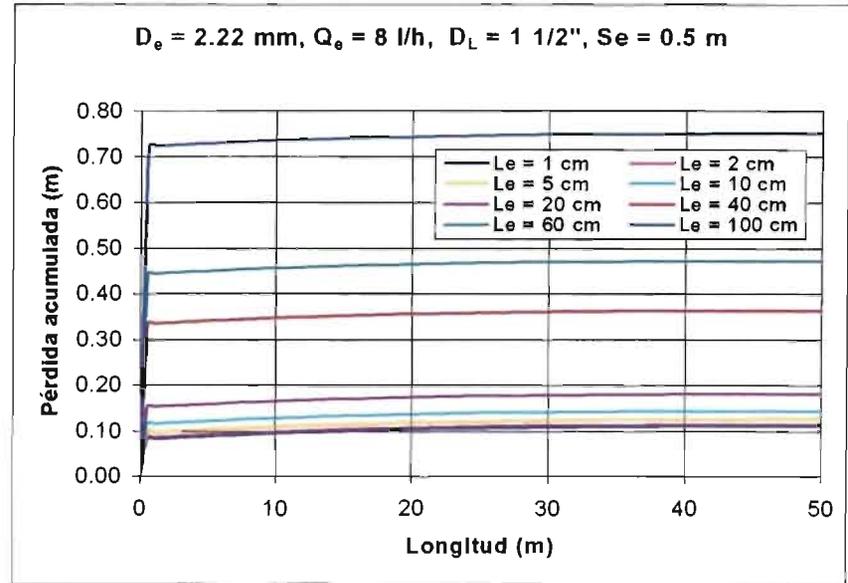
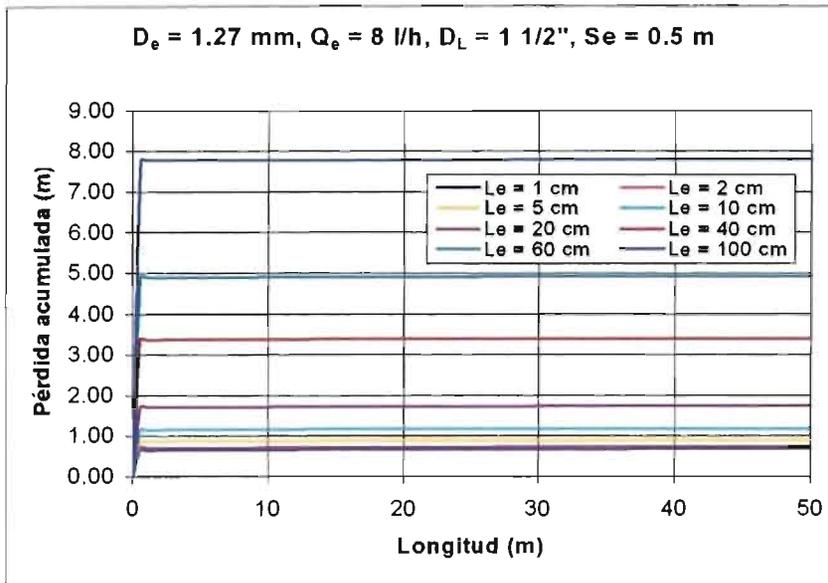


Figura 6.18. Gráficas del lateral, diámetro 1 1/2", separación de 0.5 m y gasto 8 L/h.

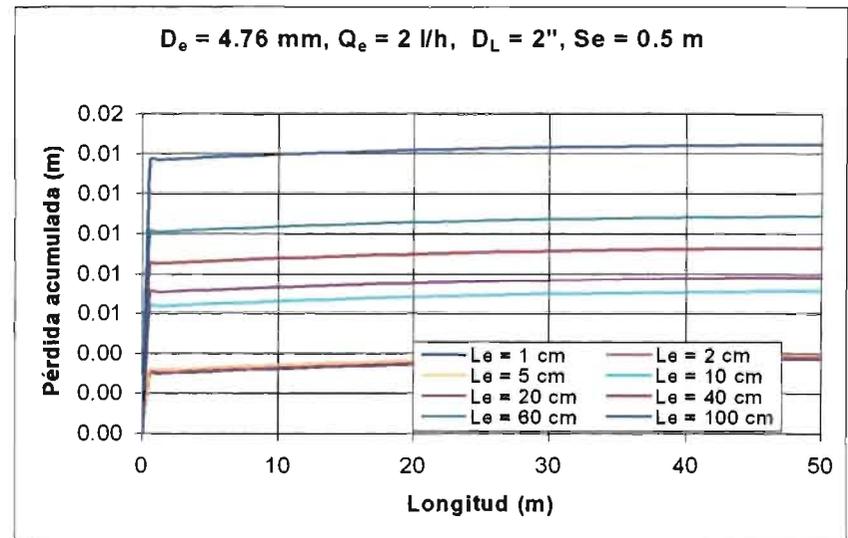
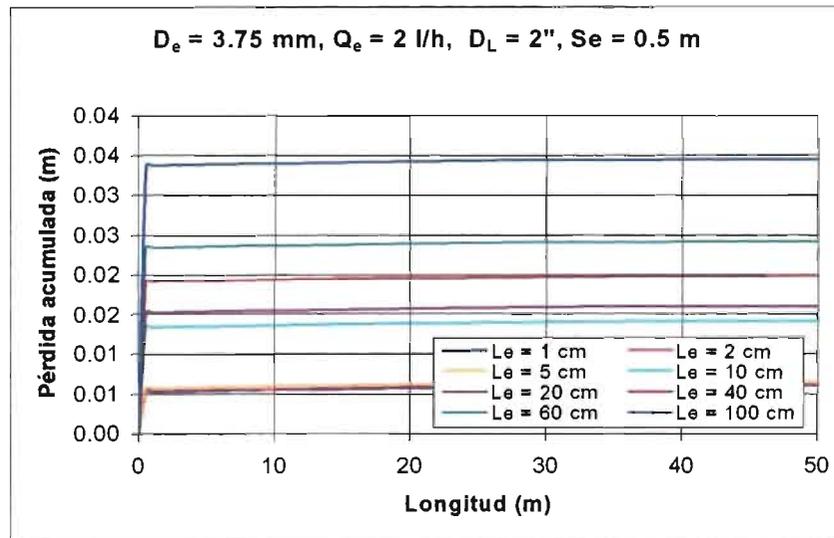
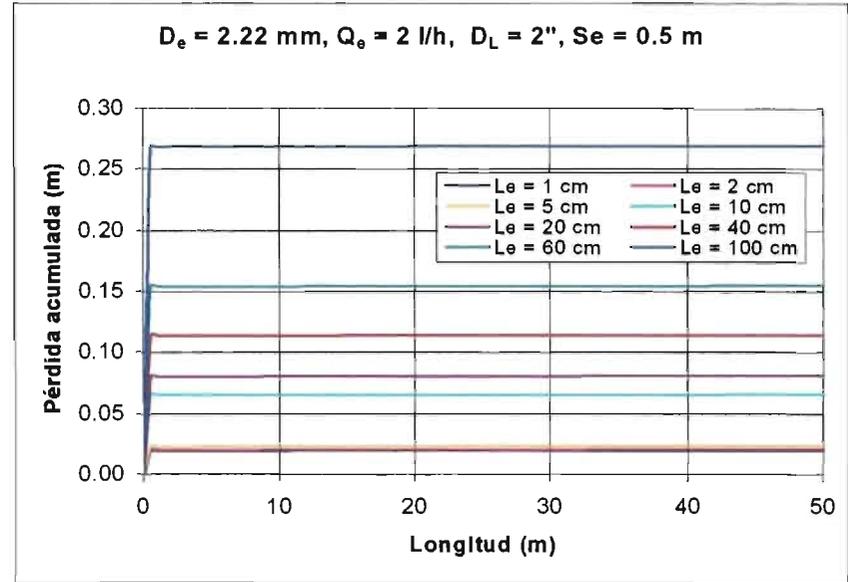
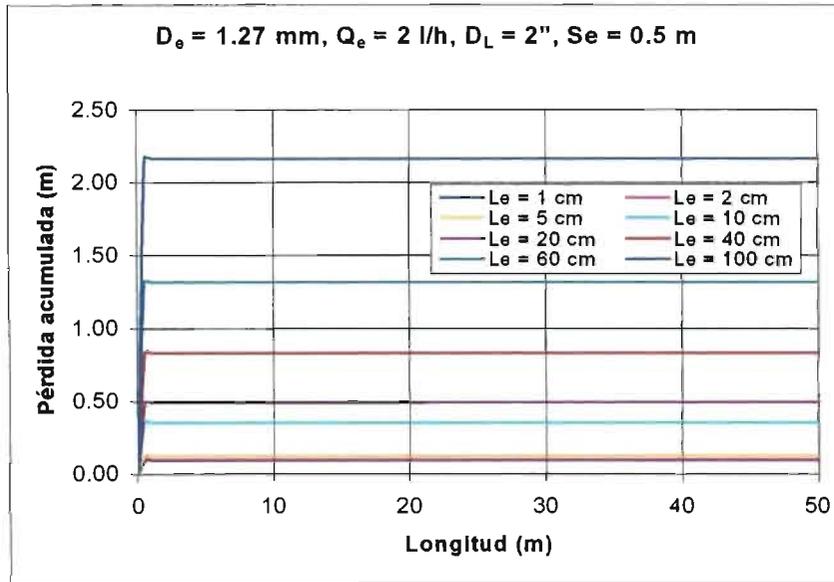


Figura 6.19. Gráficas del lateral, diámetro 2", separación de 0.5 m y gasto 2 L/h.

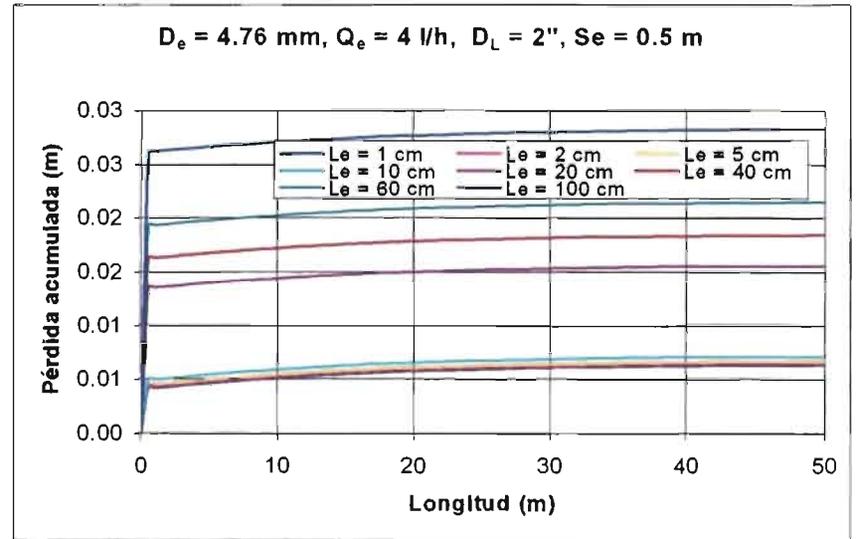
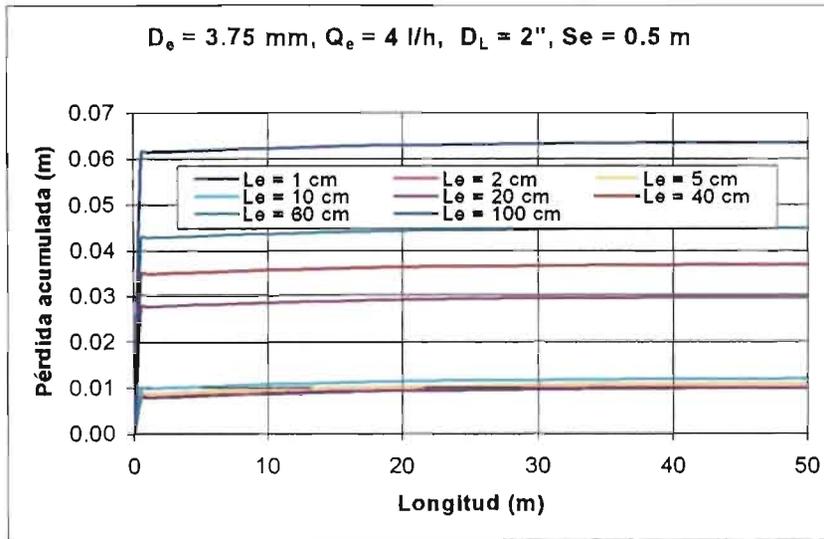
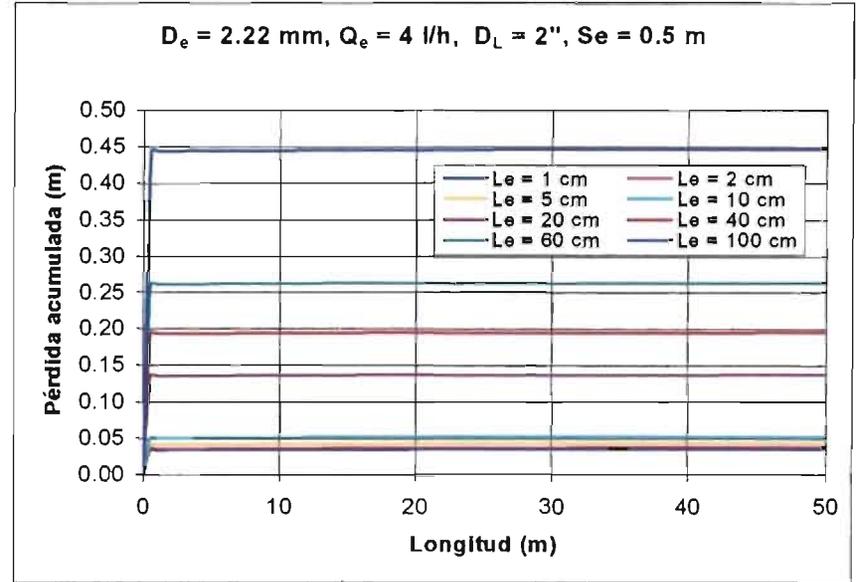
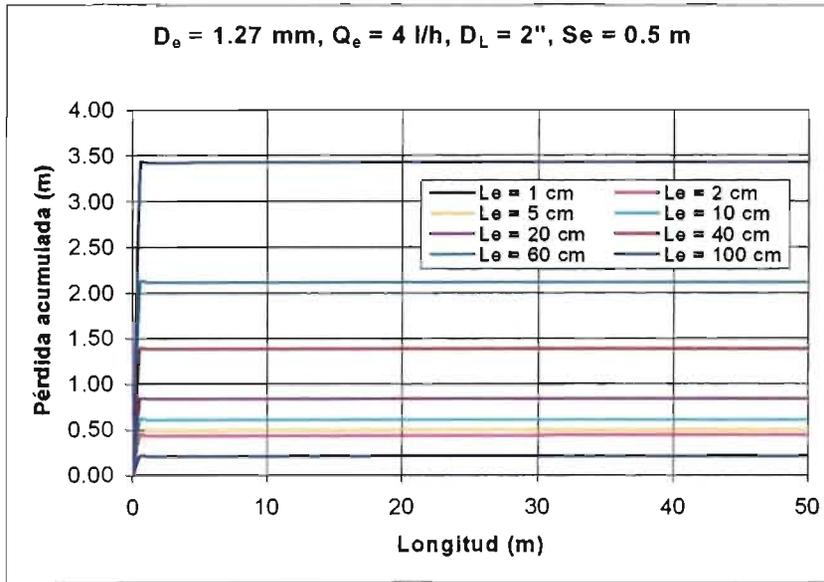


Figura 6.20. Gráficas del lateral, diámetro 2", separación de 0.5 m y gasto 4 L/h.

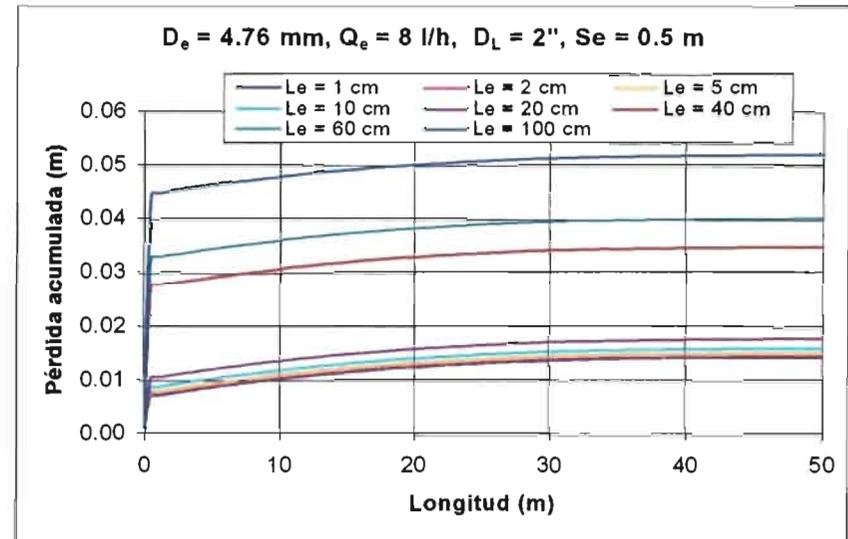
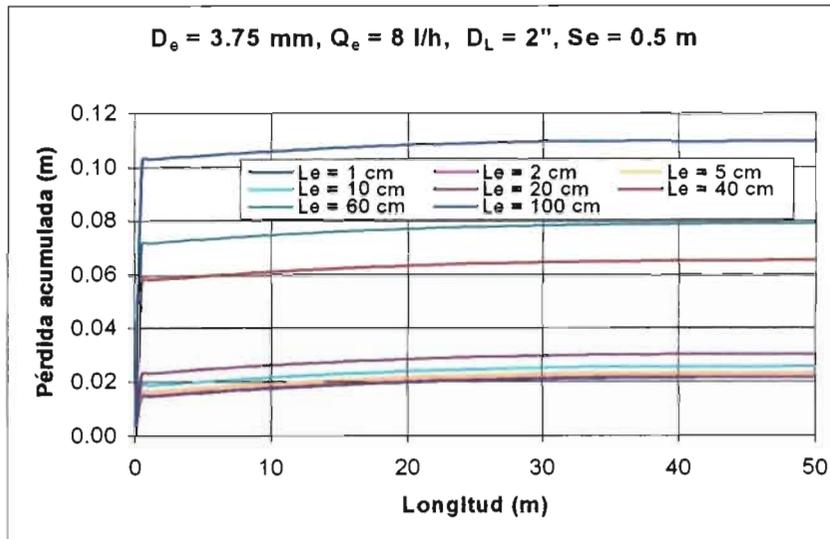
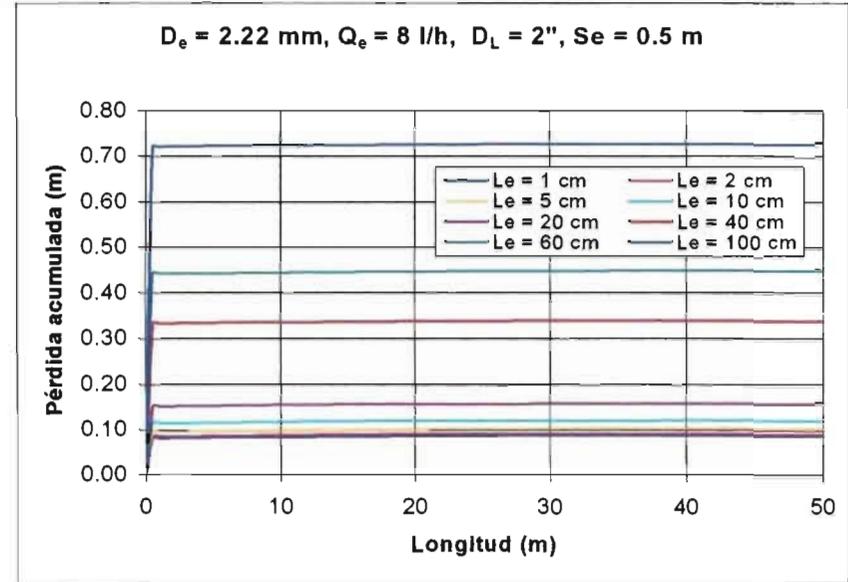
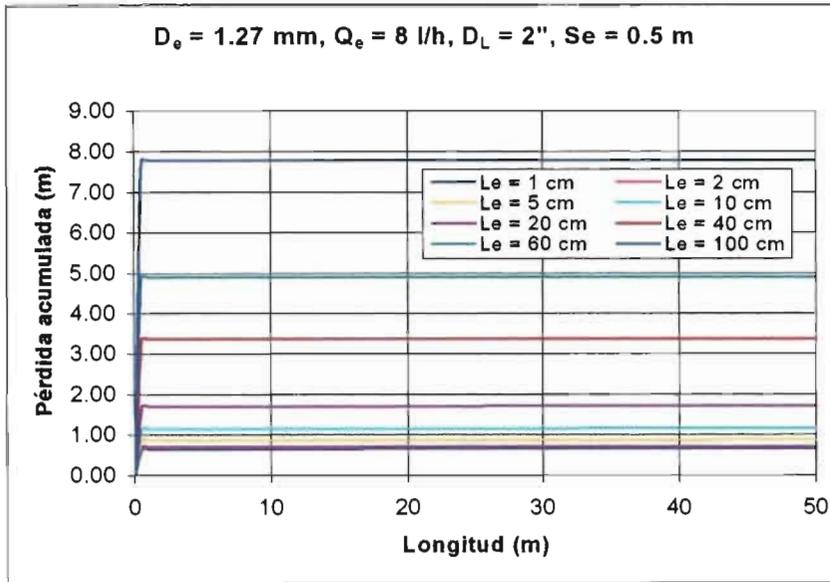


Figura 6.21. Gráficas del lateral, diámetro 2'', separación de 0.5 m y gasto 8 L/h.

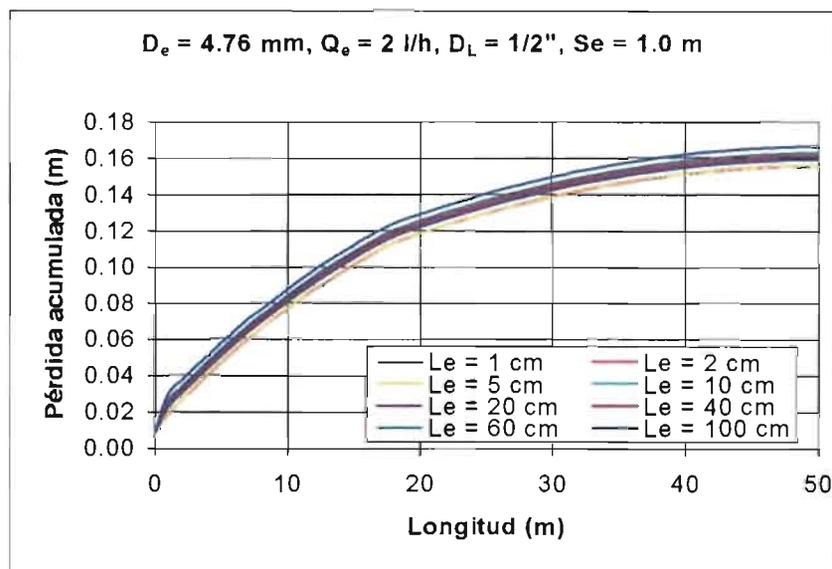
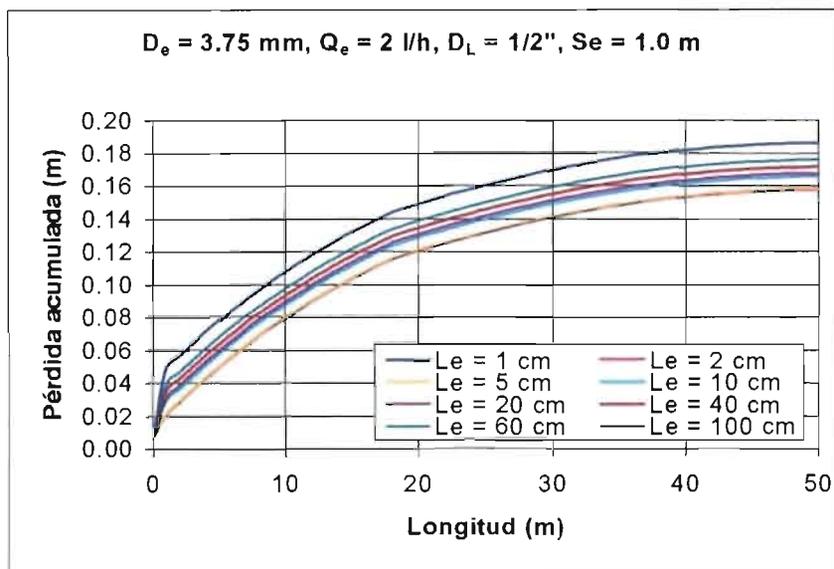
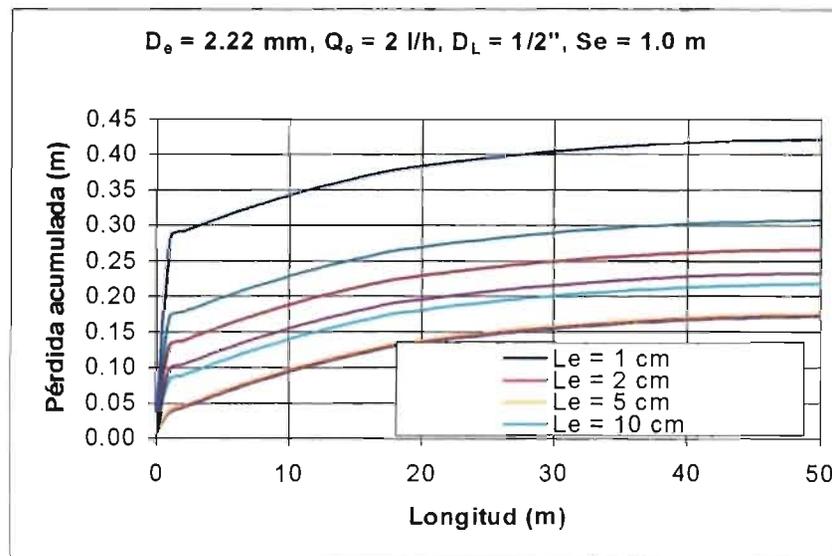
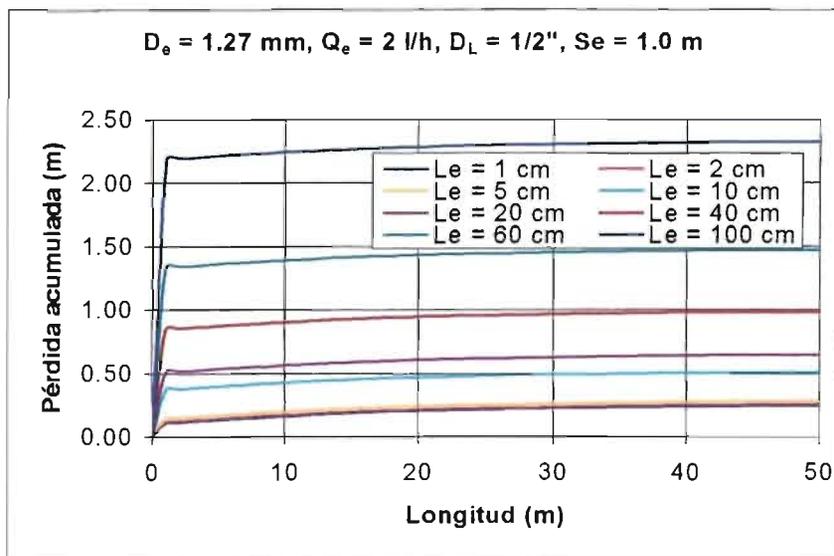


Figura 6.22. Gráficas del lateral, diámetro 1/2", separación de 1.0 m y gasto 2 L/h.

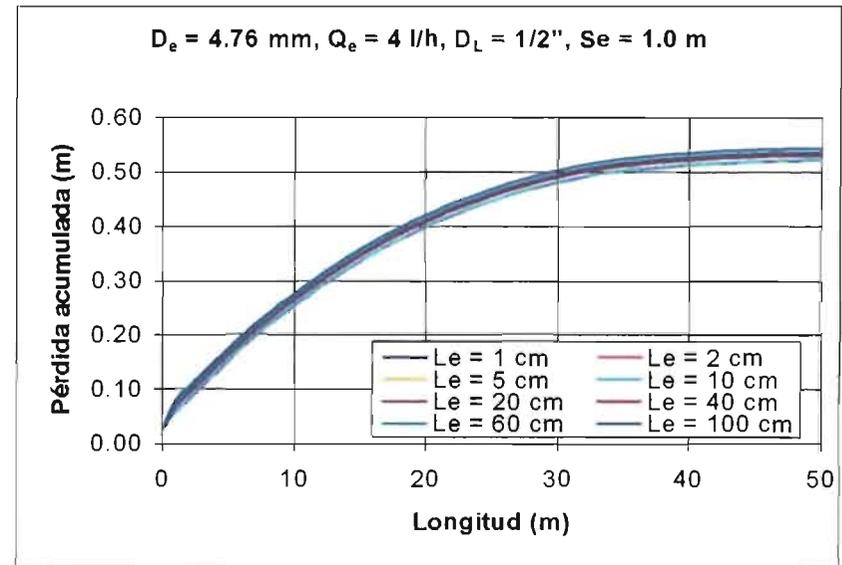
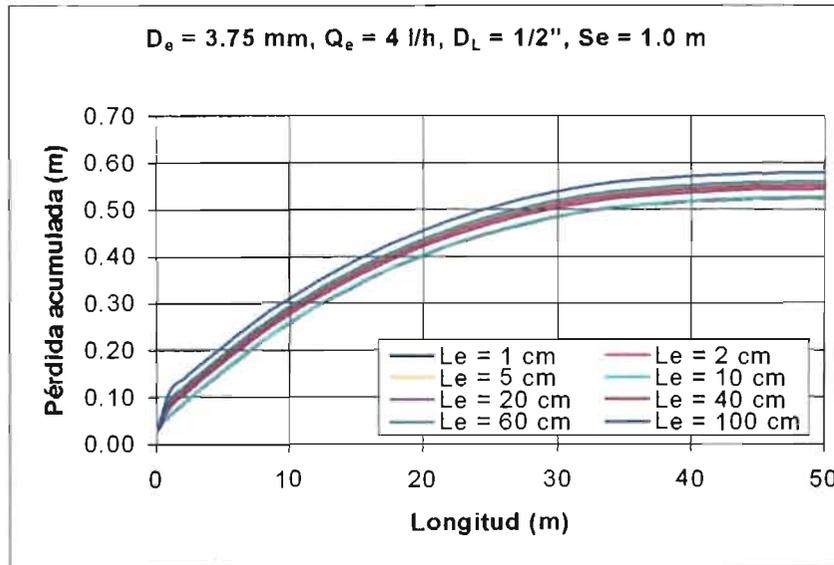
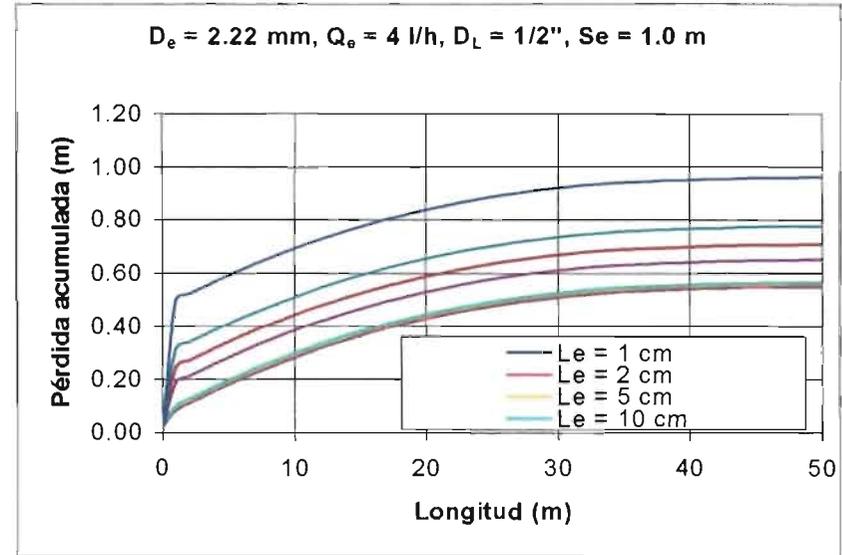
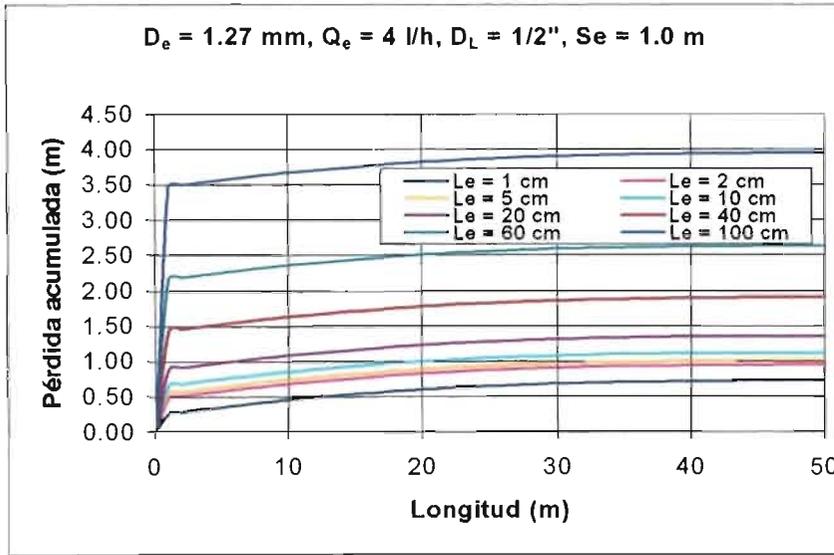


Figura 6.23. Gráficas del lateral, diámetro 1/2", separación de 1.0 m y gasto 4 L/h

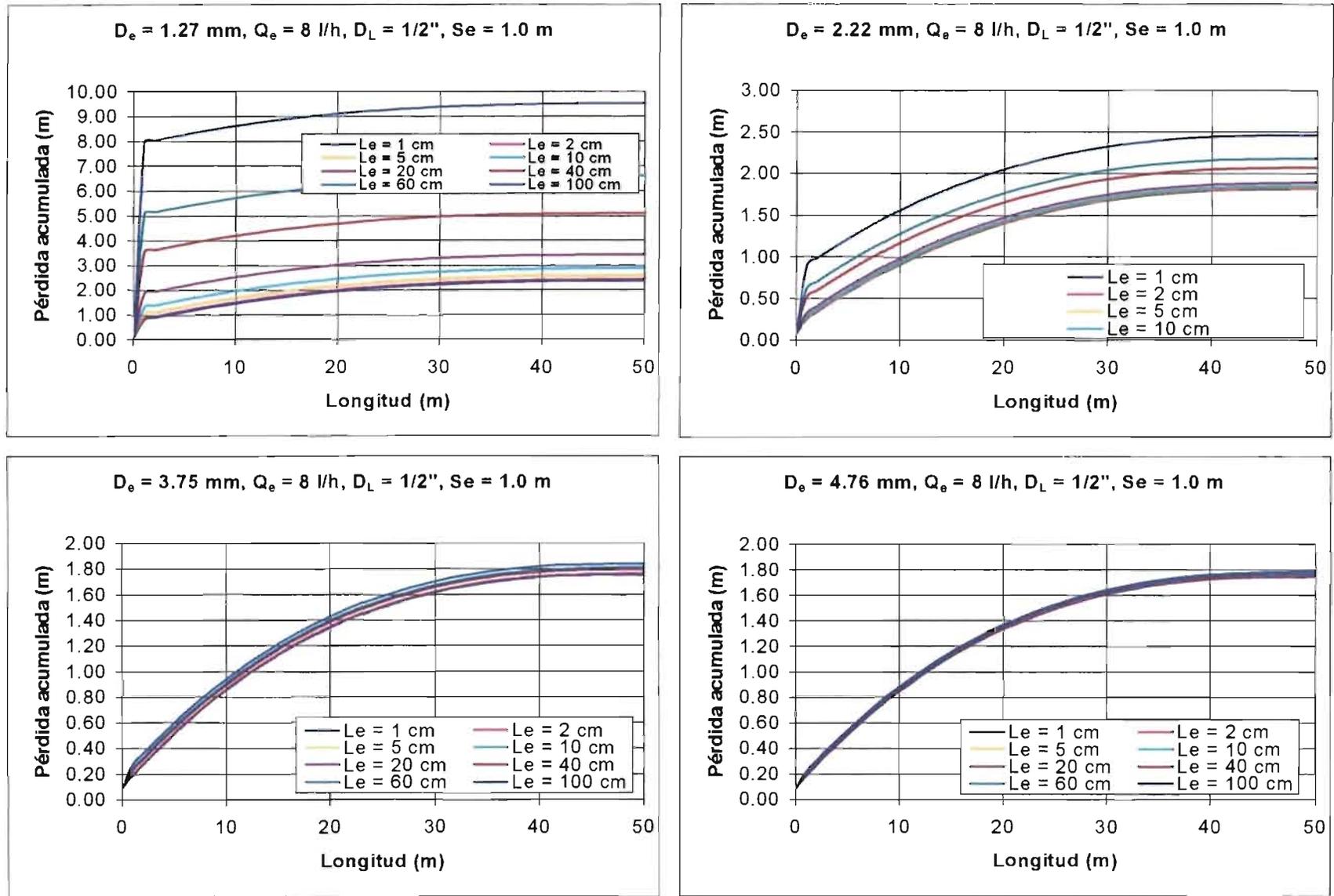


Figura 6.24. Gráficas del lateral, diámetro 1/2", separación de 1.0 m y gasto 8 L/h.

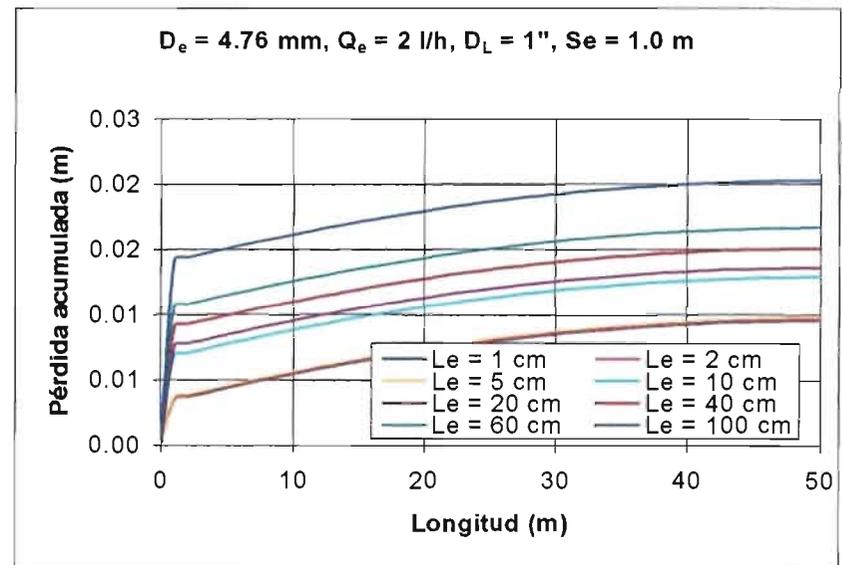
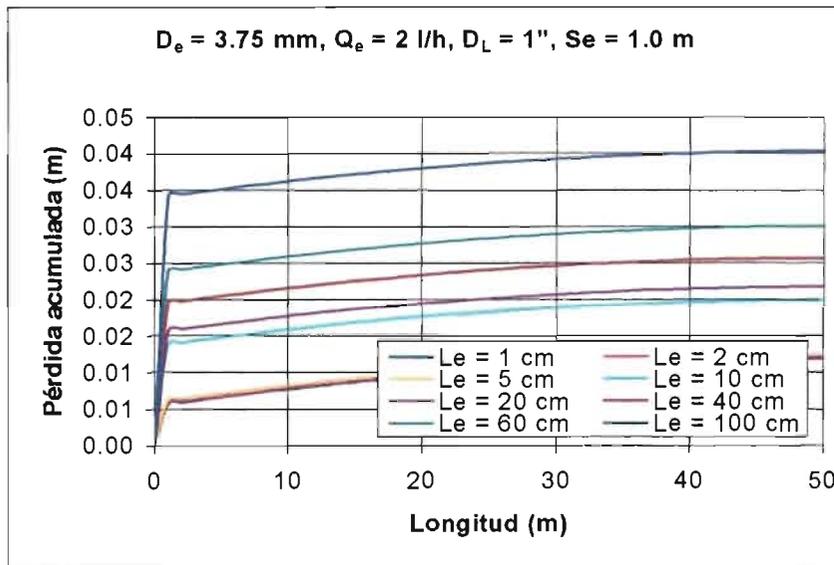
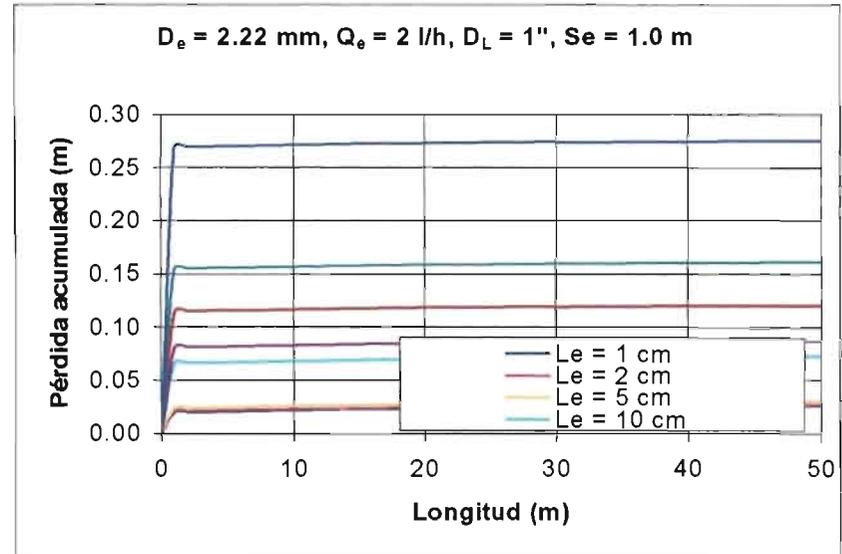
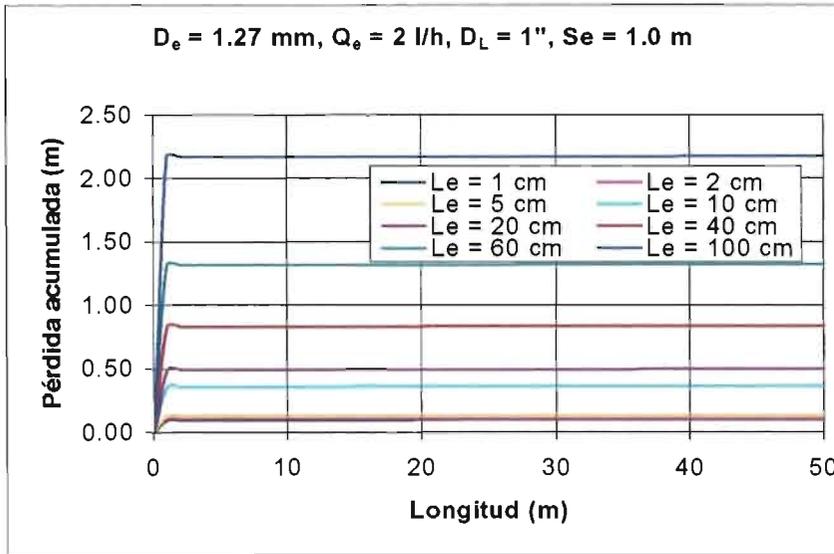


Figura 6.25. Gráficas del lateral, diámetro 1", separación de 1.0 m y gasto 2 L/h.

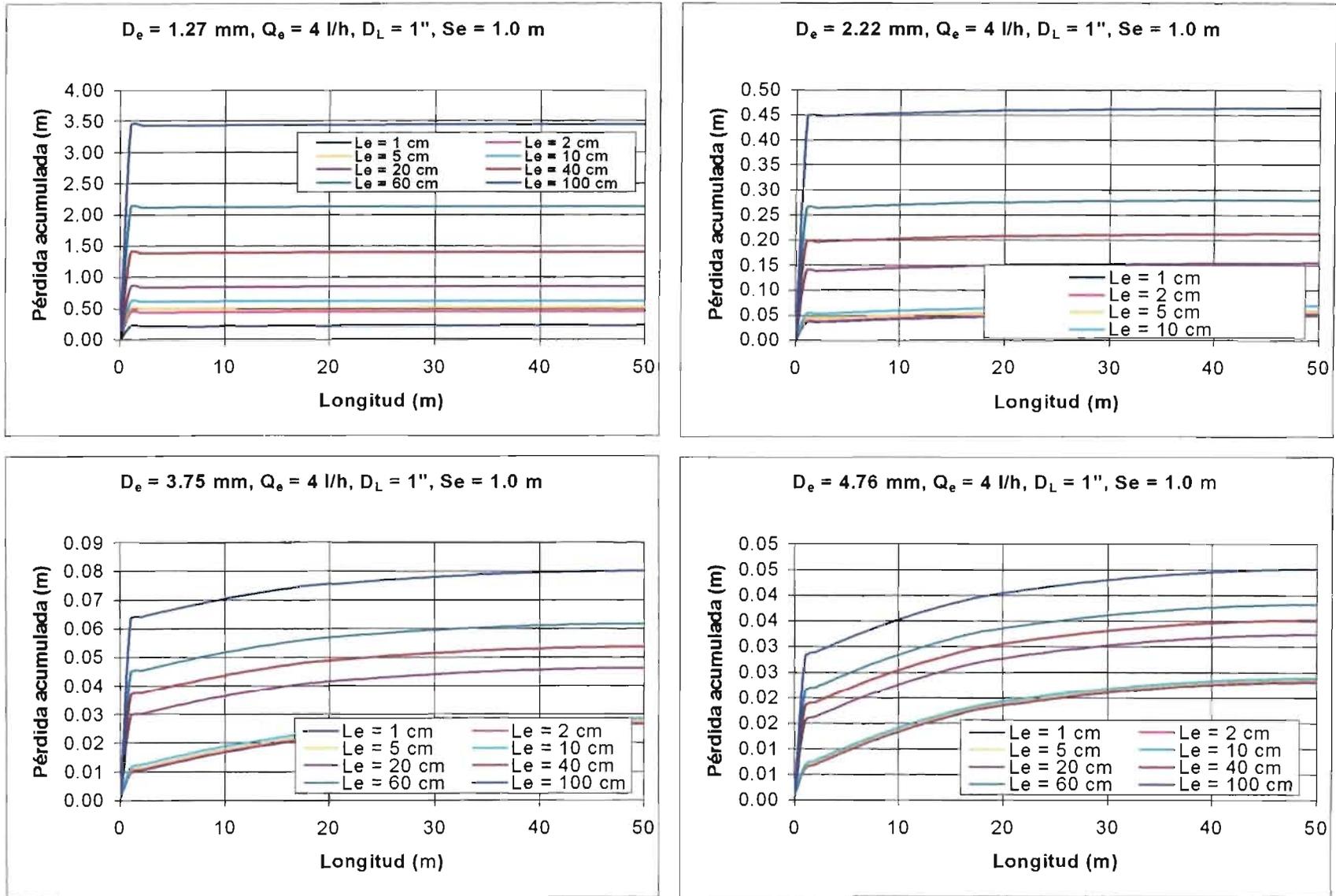


Figura 6.26. Gráficas del lateral, diámetro 1", separación de 1.0 m y gasto 4 L/h.

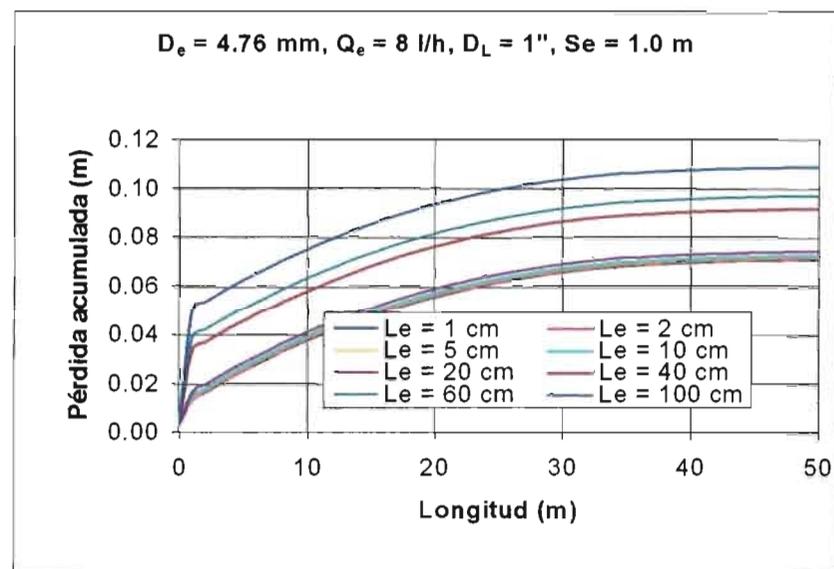
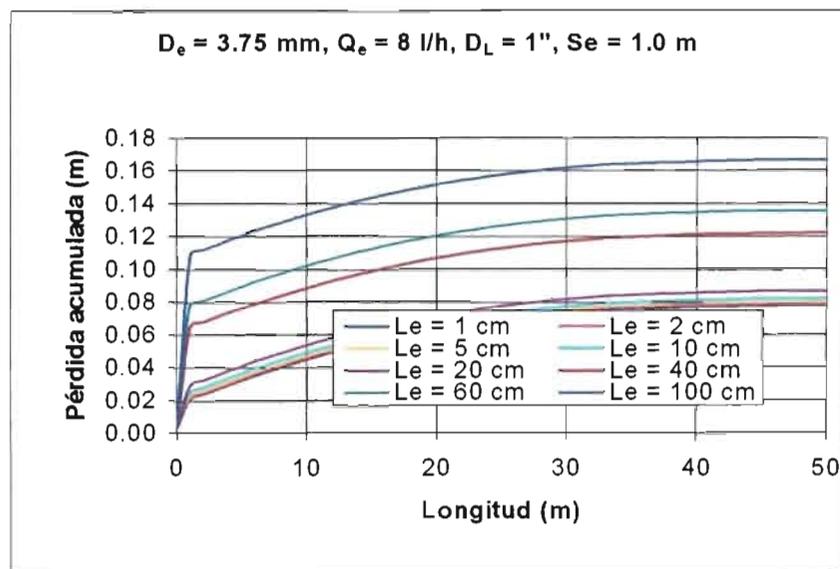
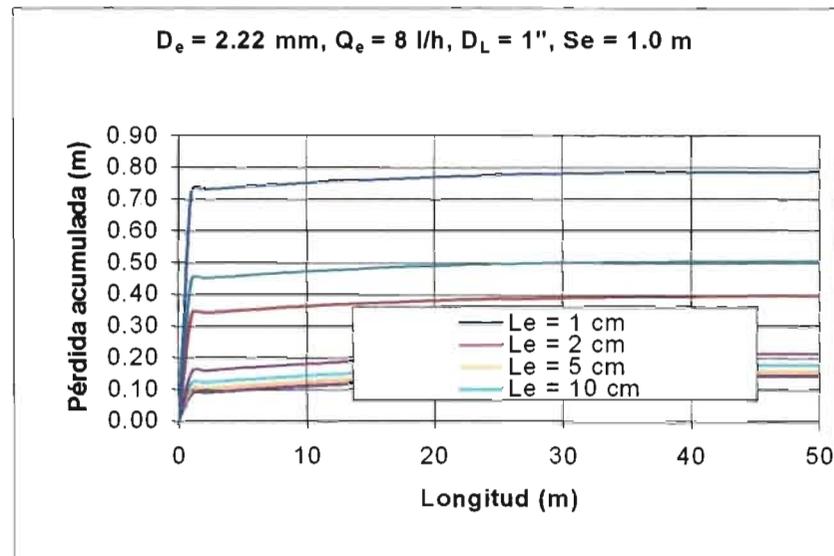
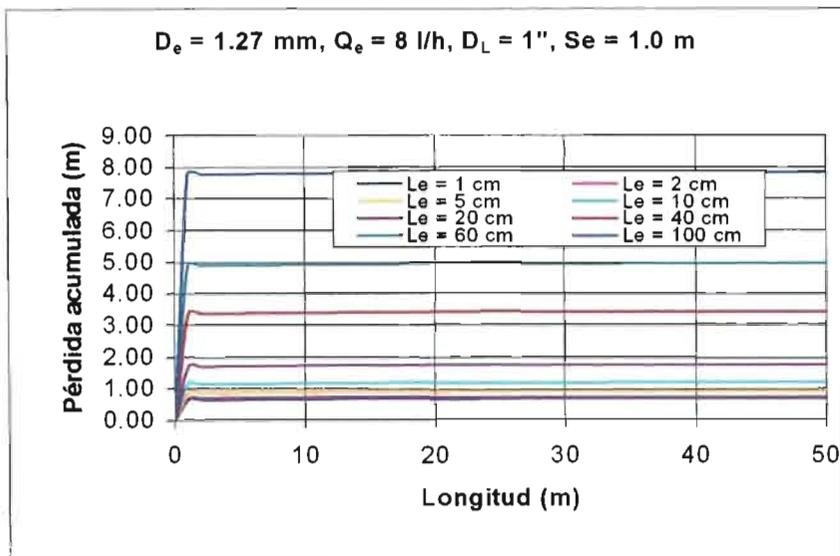


Figura 6.27. Gráficas del lateral, diámetro 1", separación de 1.0 m y gasto 8 L/h.

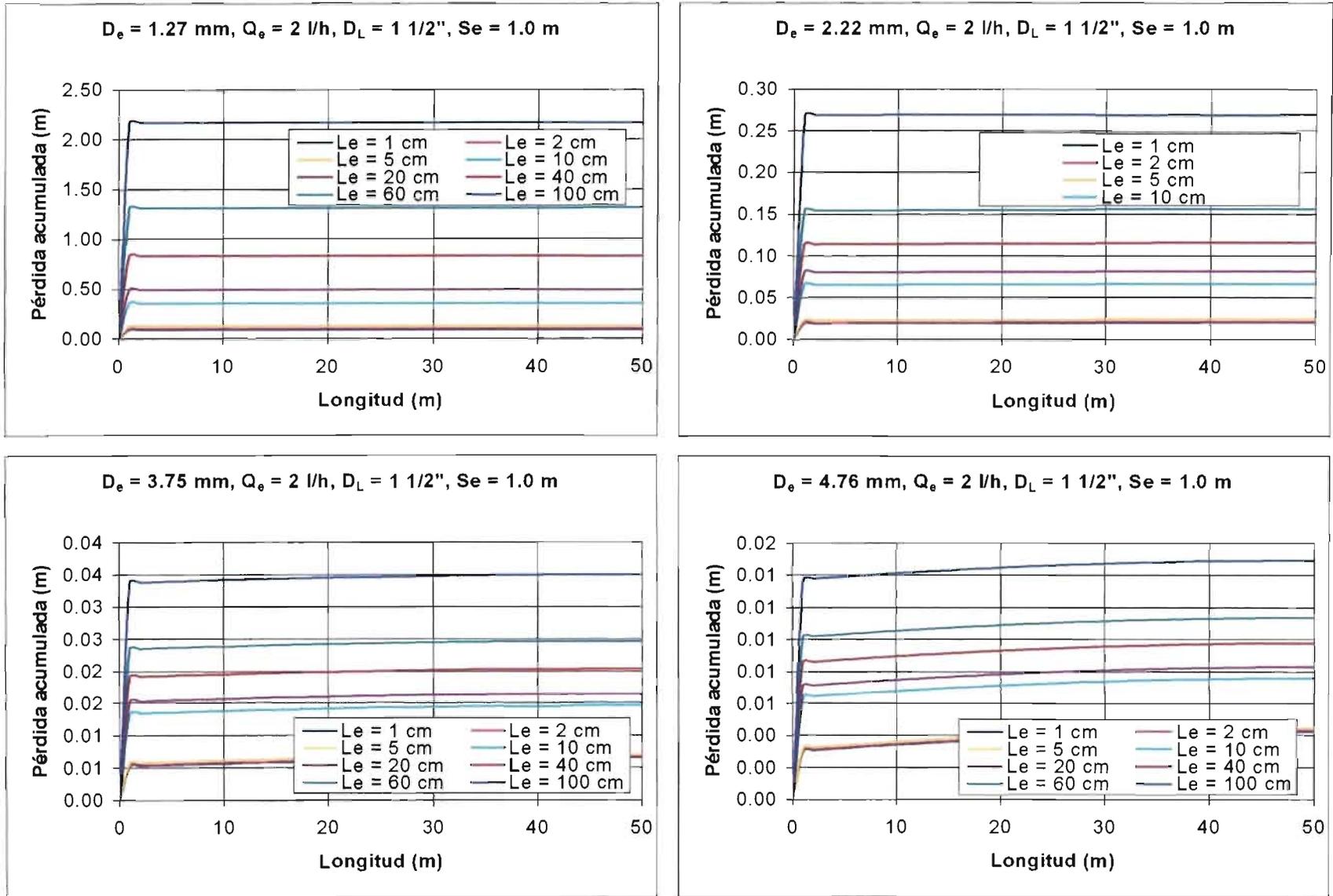


Figura 6.28. Gráficas del lateral, diámetro 1 1/2", separación de 1.0 m y gasto 2 L/h.

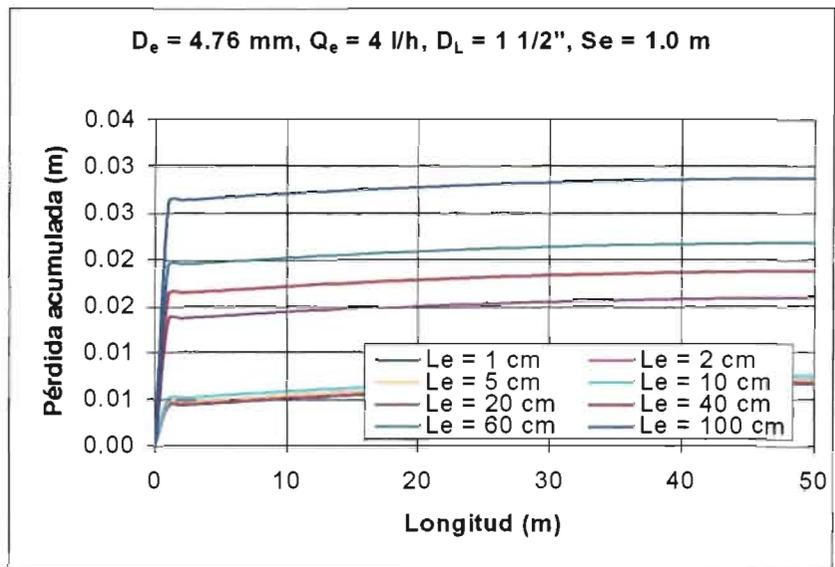
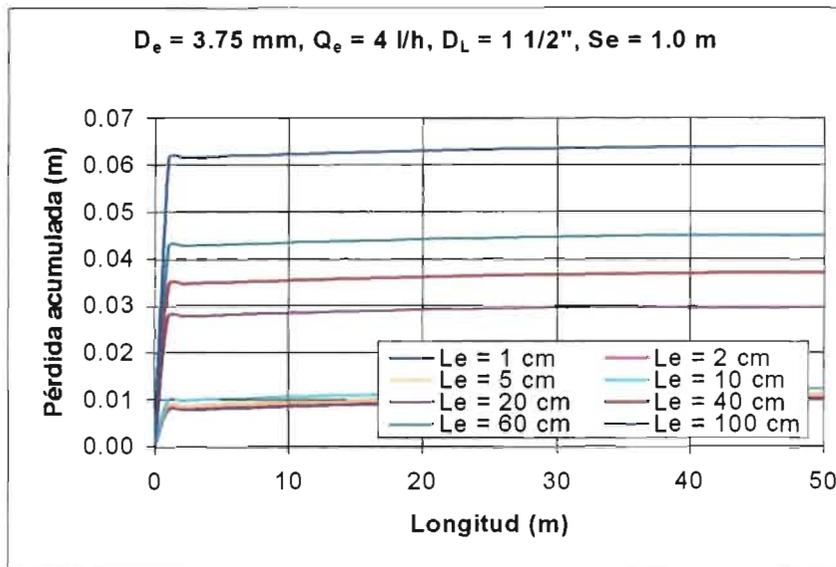
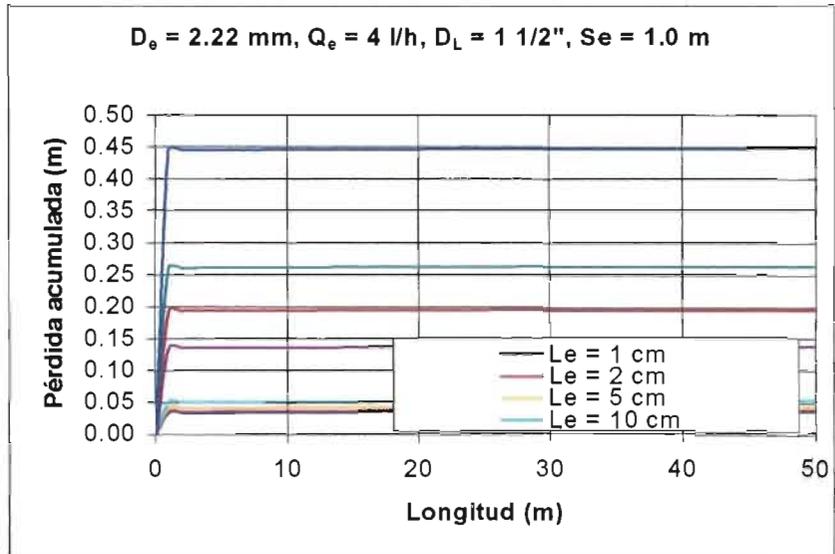
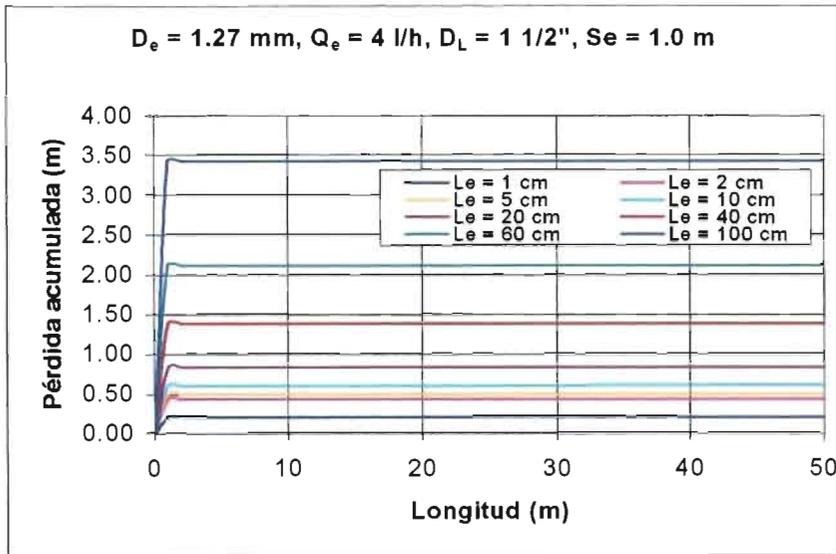


Figura 6.29. Gráficas del lateral, diámetro 1 1/2", separación de 1.0 m y gasto 4 L/h

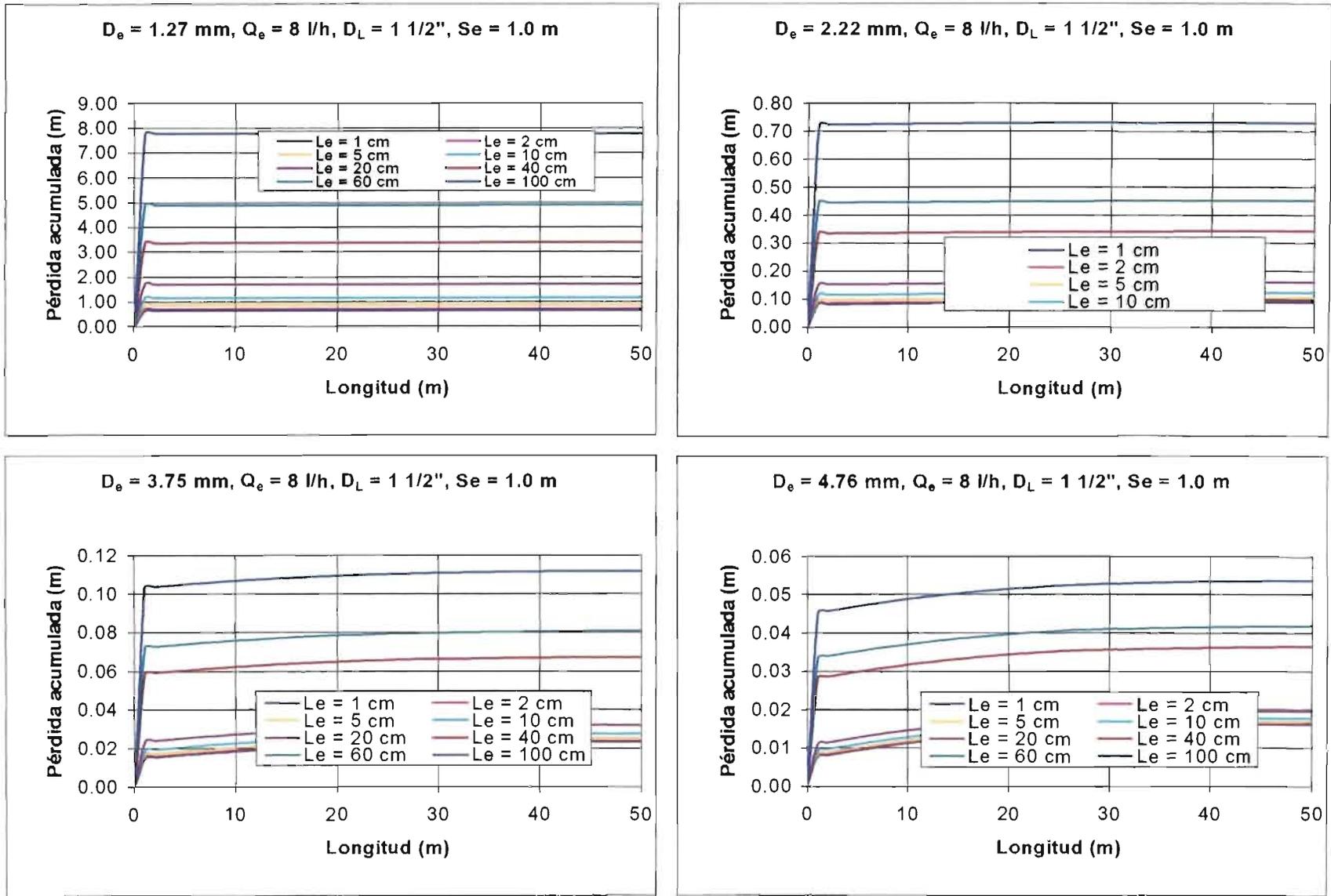


Figura 6.30. Gráficas del lateral, diámetro 1 1/2", separación de 1.0 m y gasto 8 L/h.

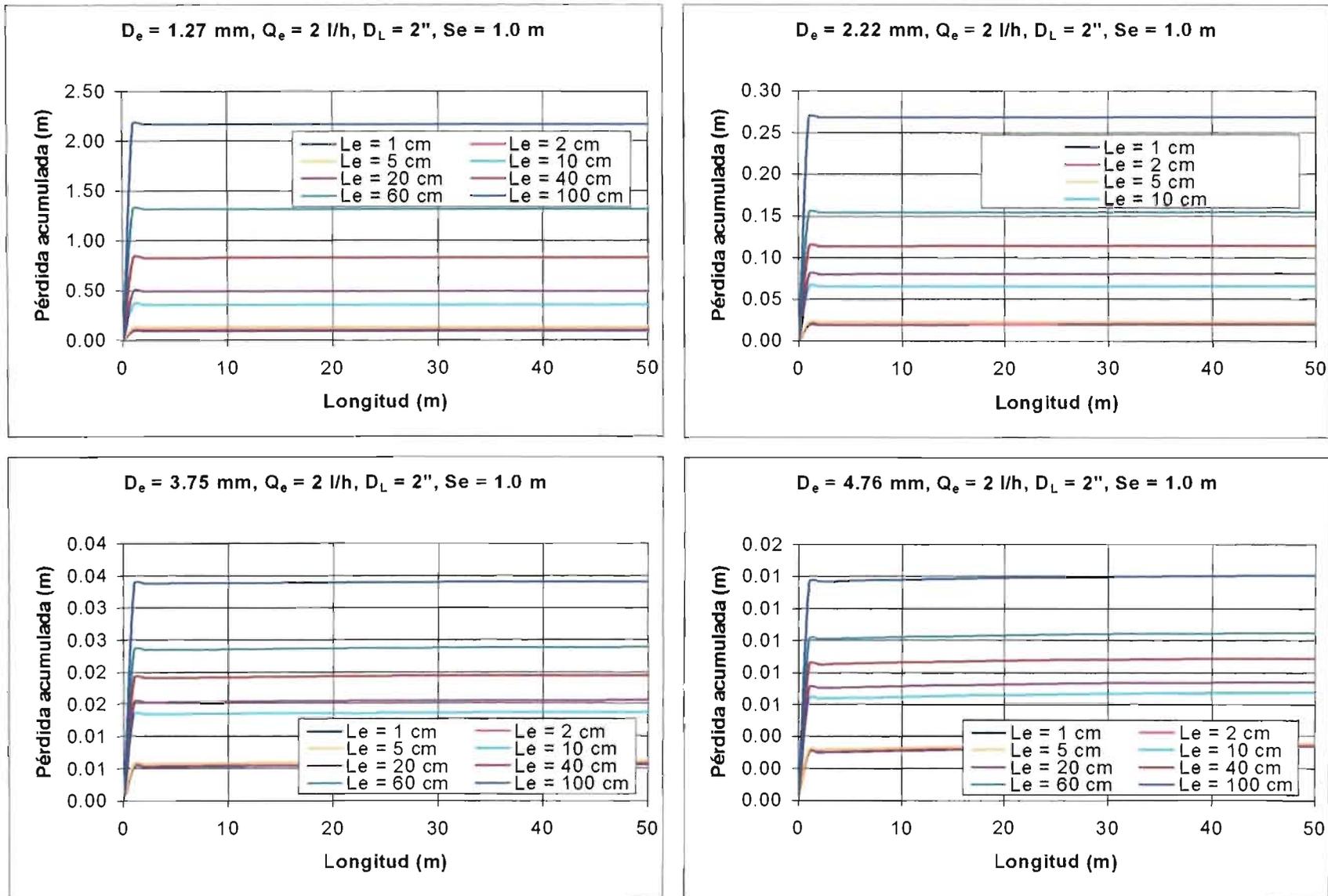


Figura 6.31. Gráficas del lateral, diámetro 2", separación de 1.0 m y gasto 2 L/h.

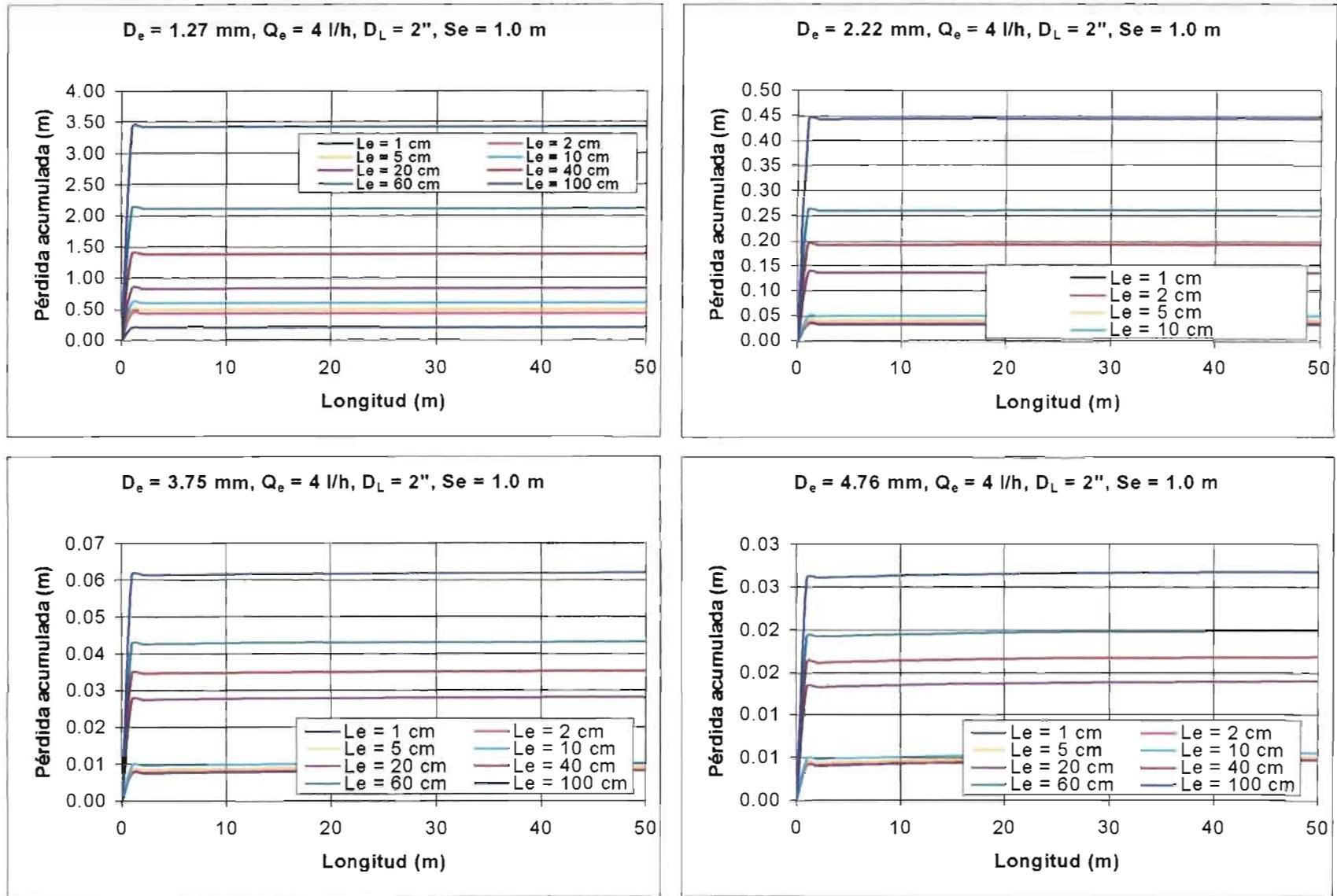


Figura 6.32. Gráficas del lateral, diámetro 2", separación de 1.0 m y gasto 4 L/h.

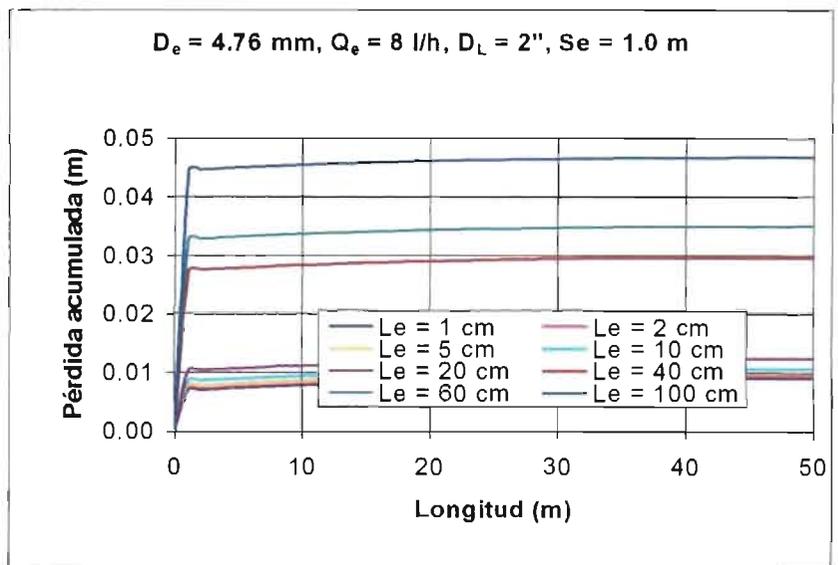
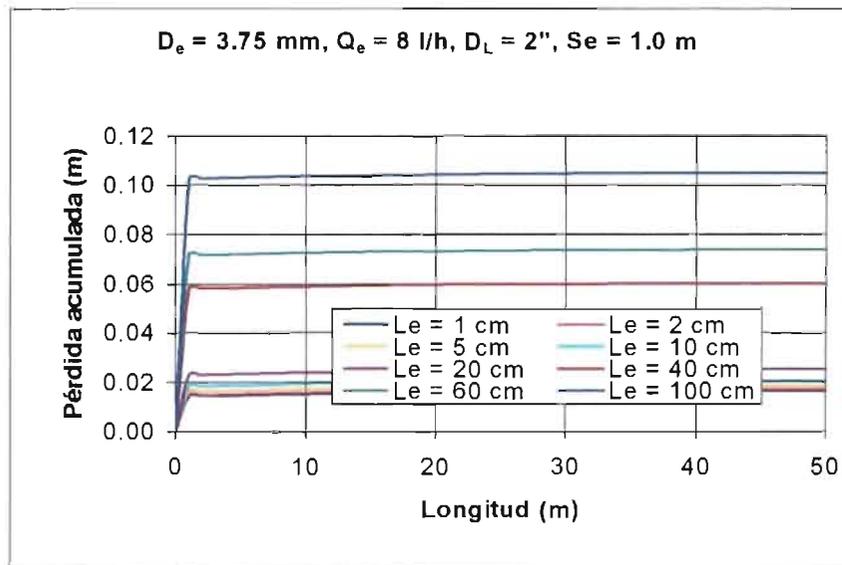
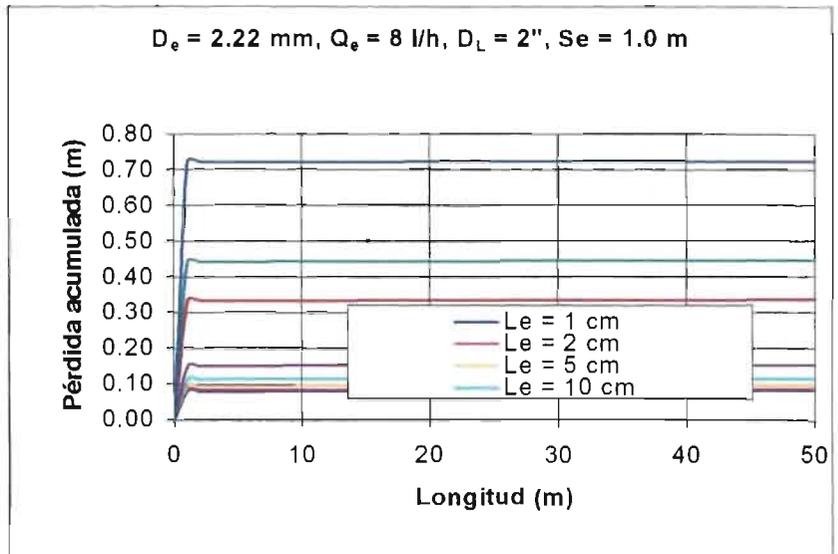
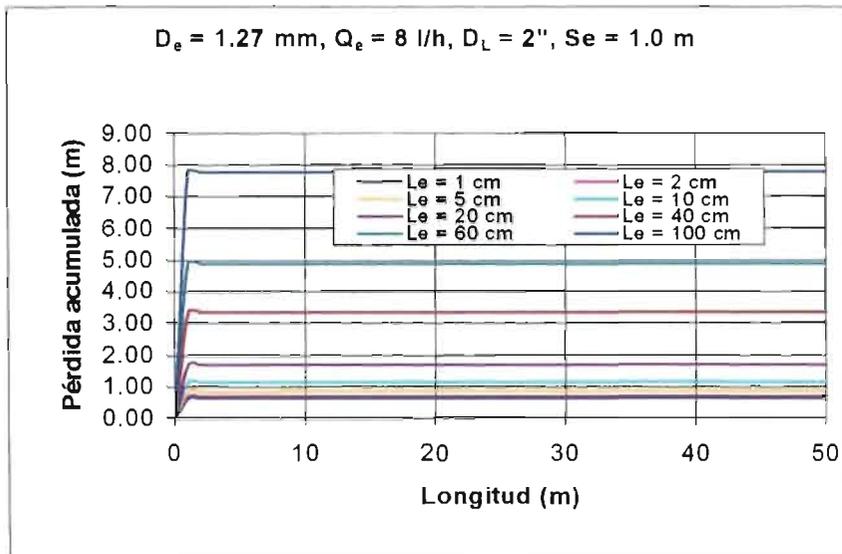


Figura 6.33. Gráficas del lateral, diámetro 2", separación de 1.0 m y gasto 8 L/h.

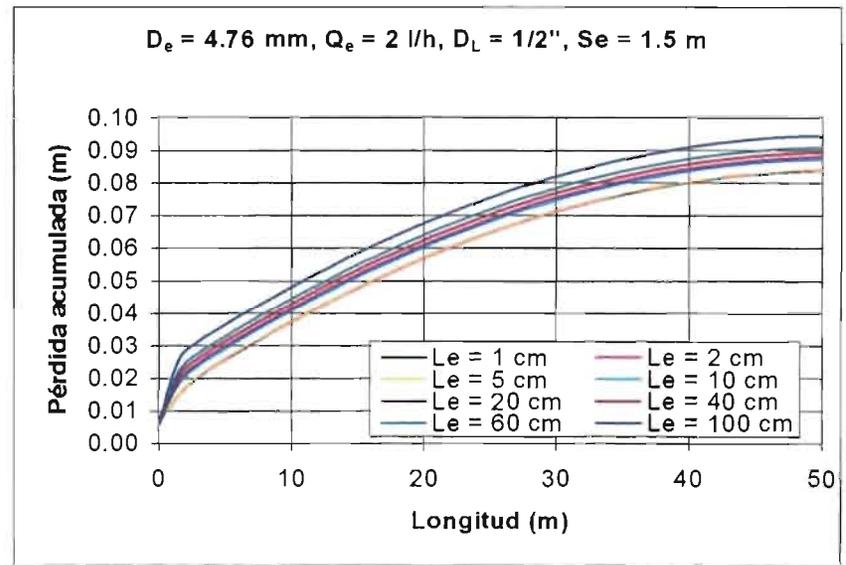
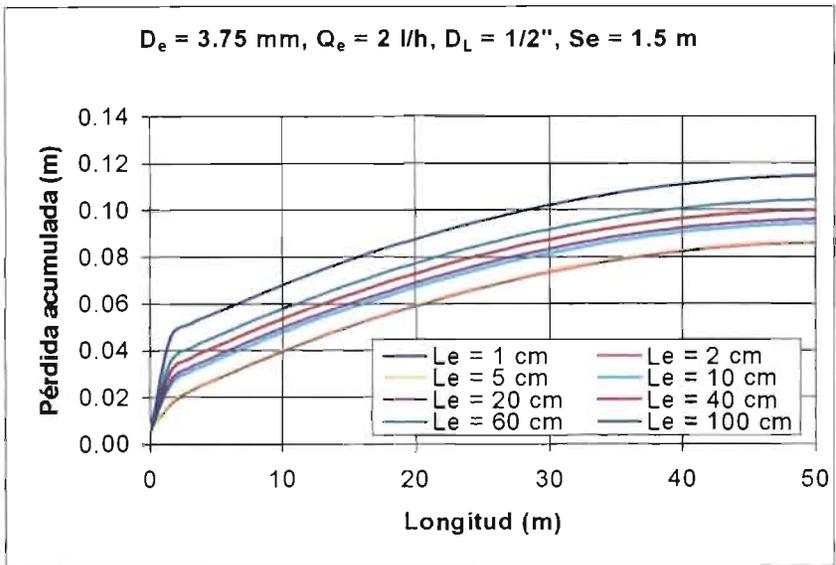
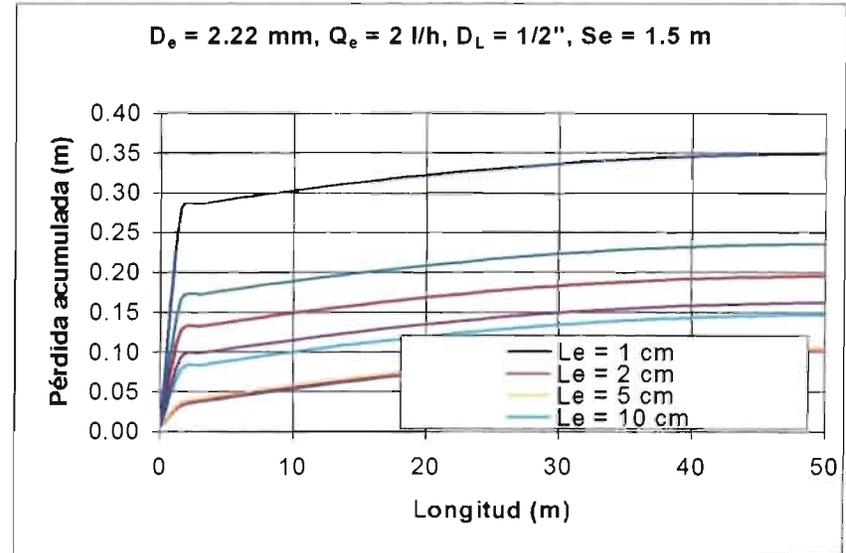
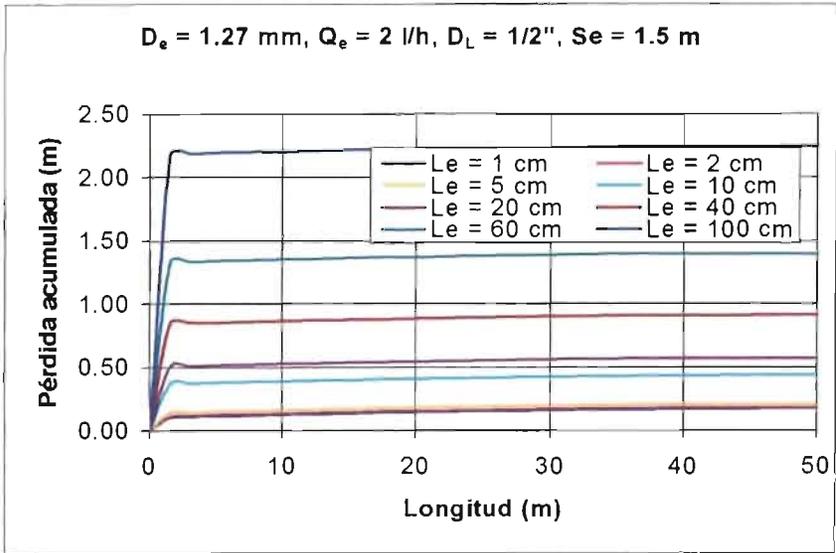


Figura 6.34. Gráficas del lateral, diámetro 1/2", separación de 1.5 m y gasto 2 L/h.

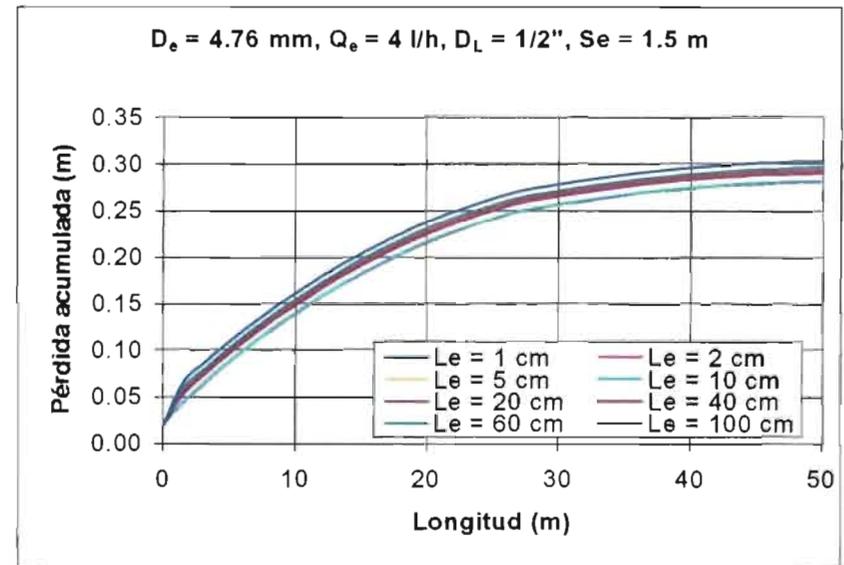
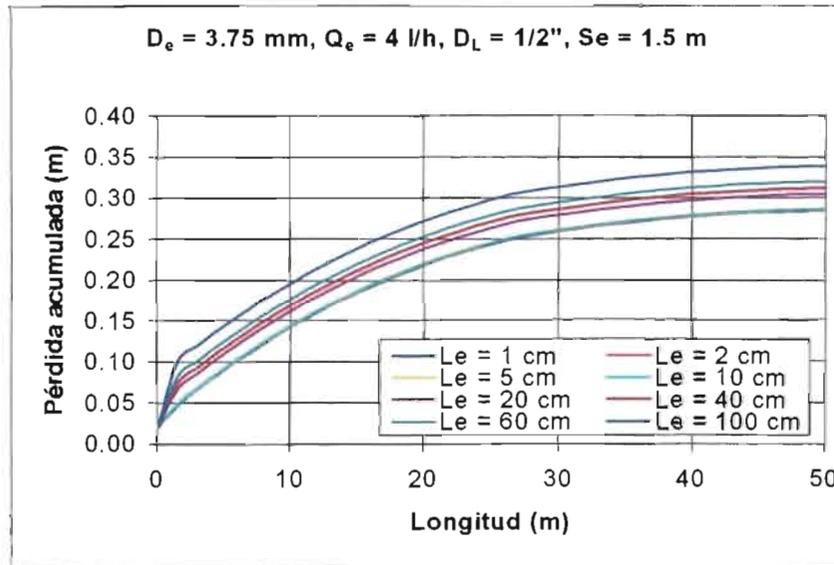
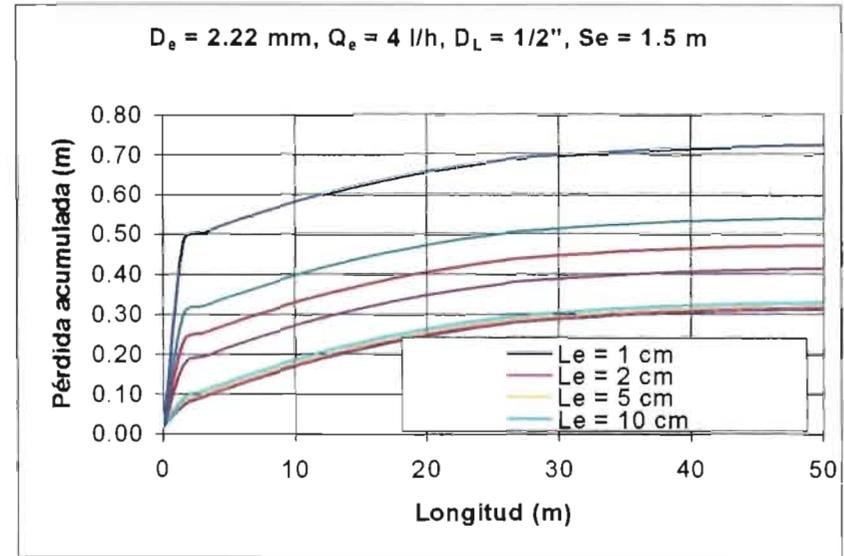
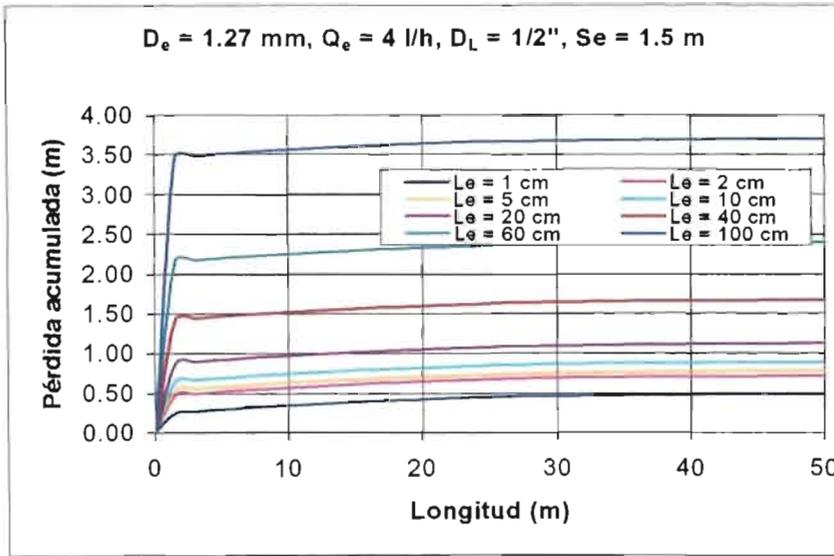


Figura 6.35. Gráficas del lateral, diámetro 1/2", separación de 1.5 m y gasto 4 L/h

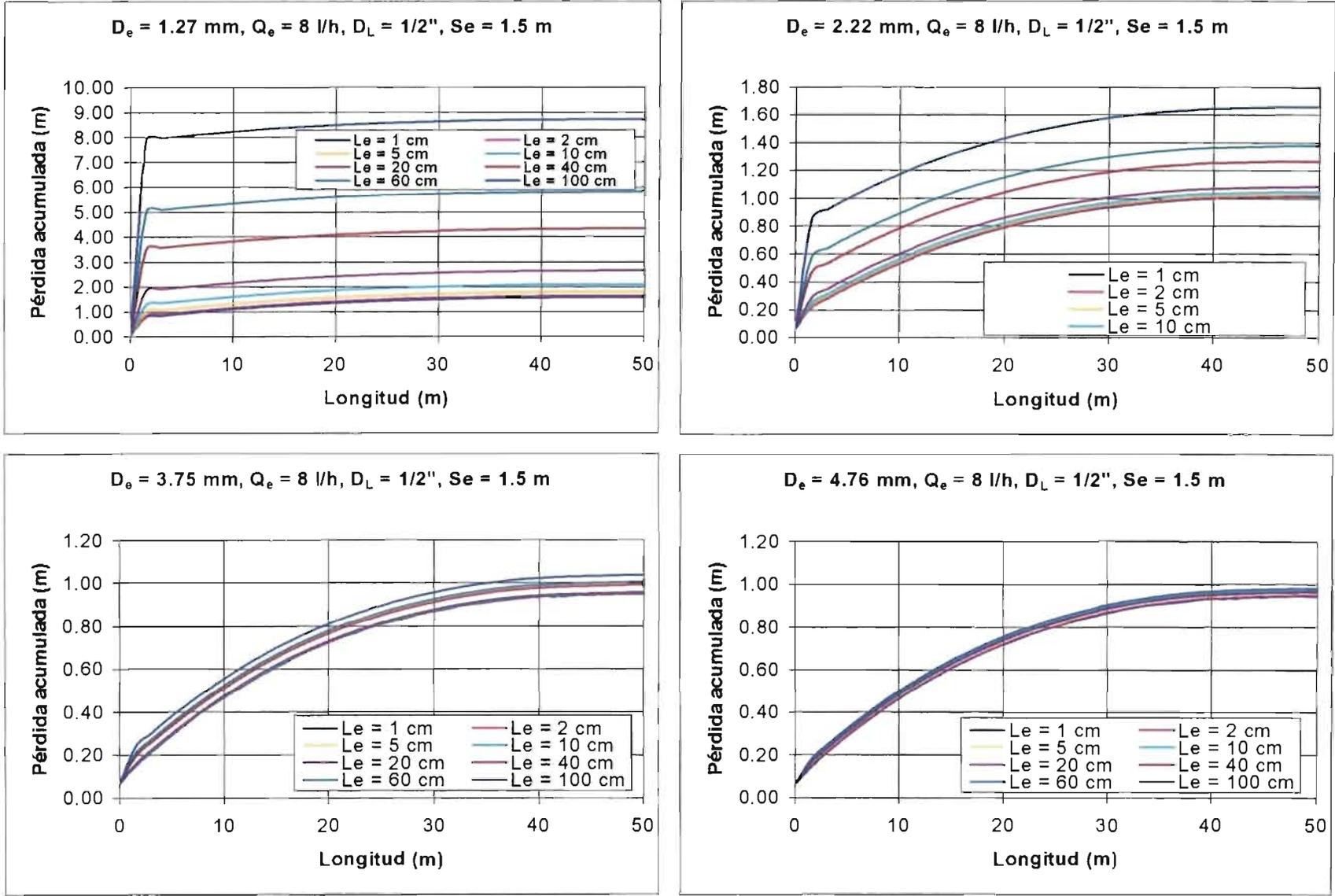


Figura 6.36. Gráficas del lateral, diámetro 1/2", separación de 1.5 m y gasto 8 L/h.

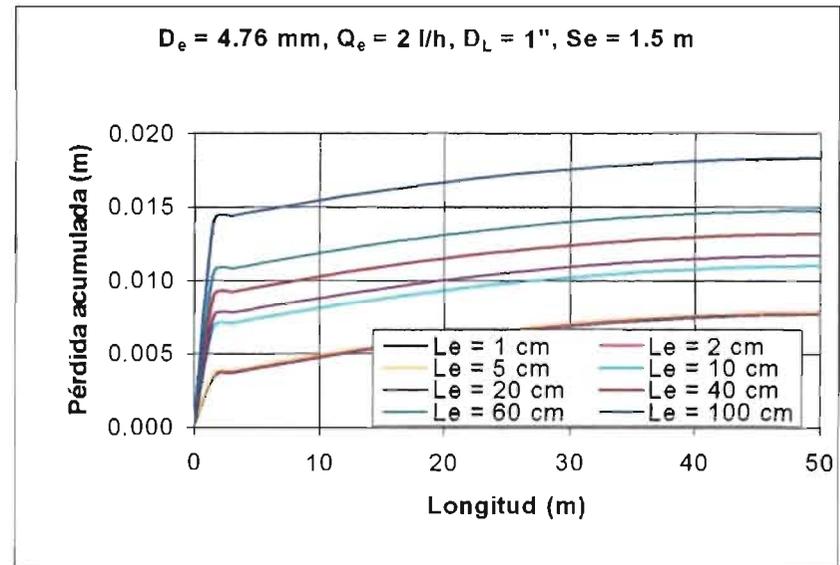
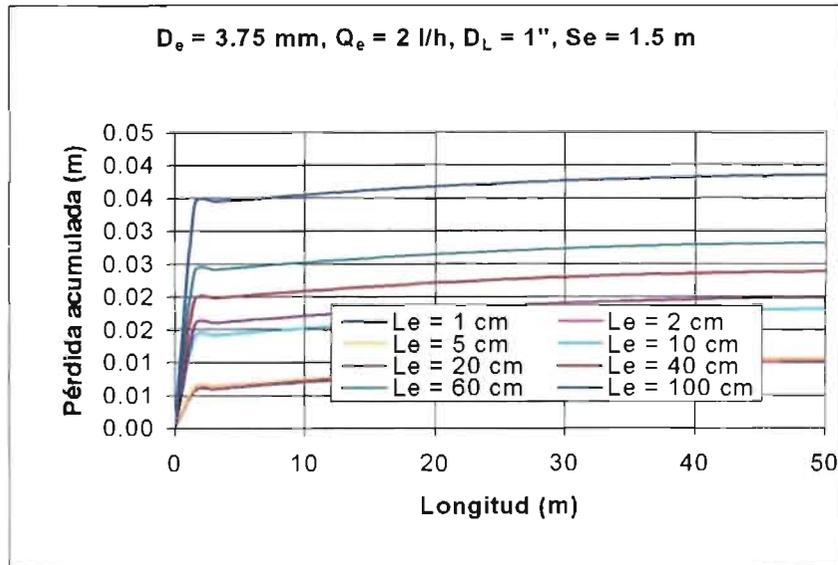
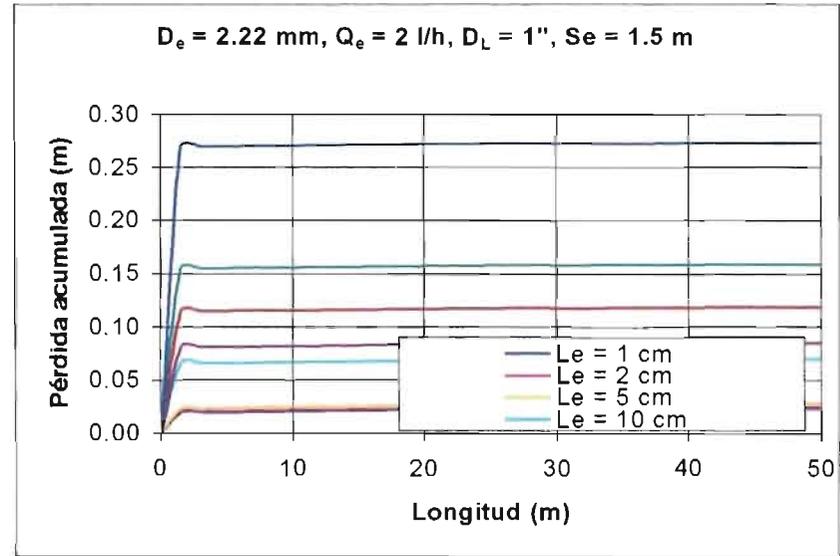
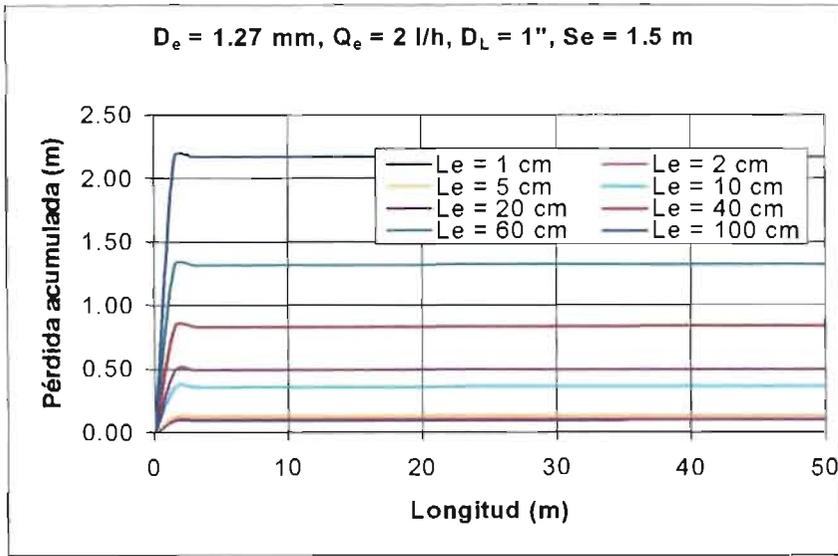


Figura 6.37. Gráficas del lateral, diámetro 1", separación de 1.5 m y gasto 2 L/h.

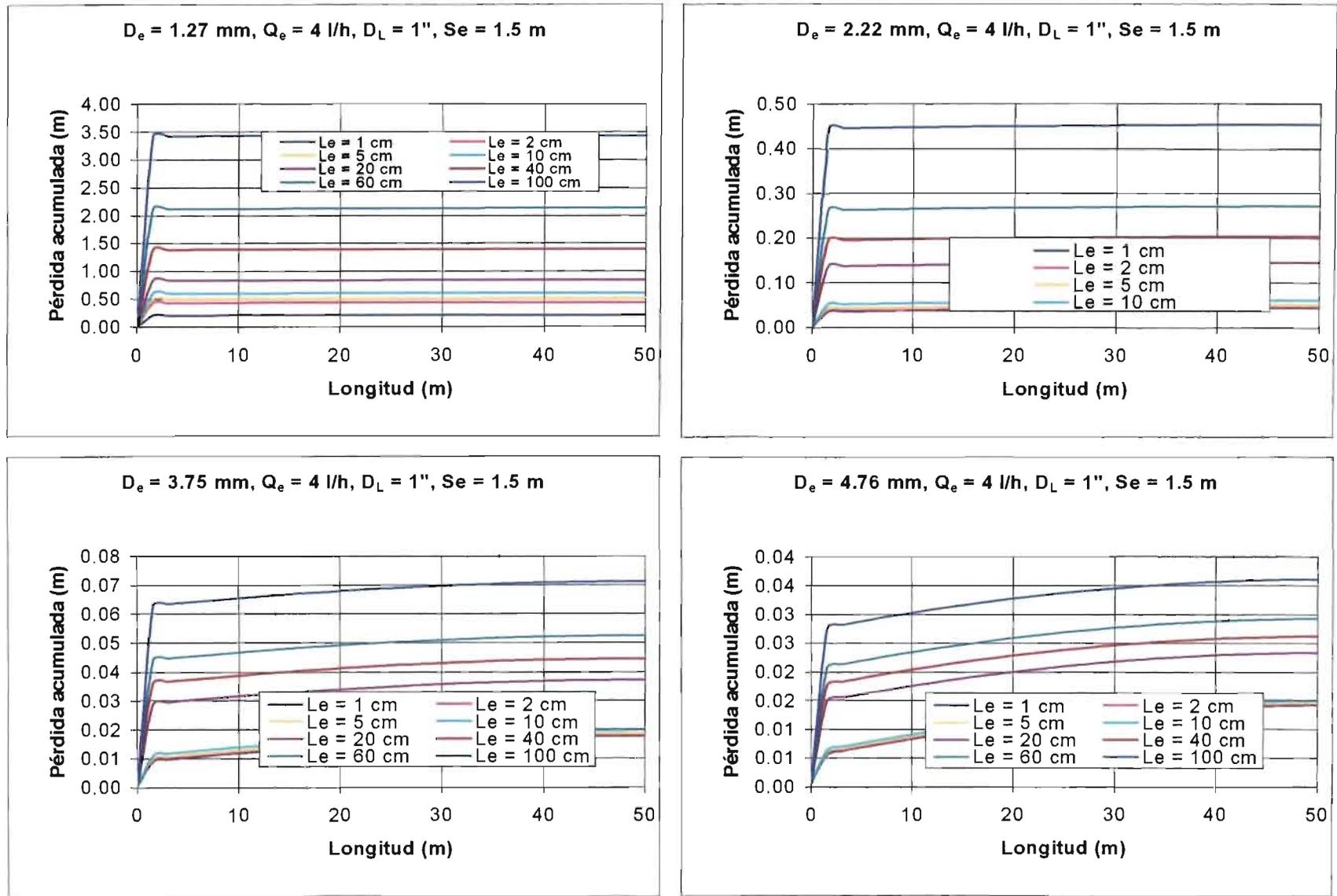


Figura 6.38. Gráficas del lateral, diámetro 1'', separación de 1.5 m y gasto 4 L/h.

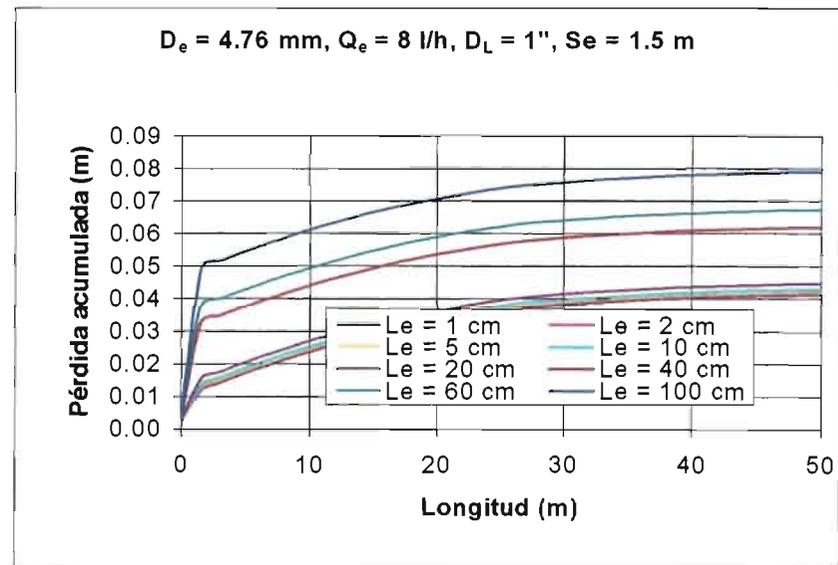
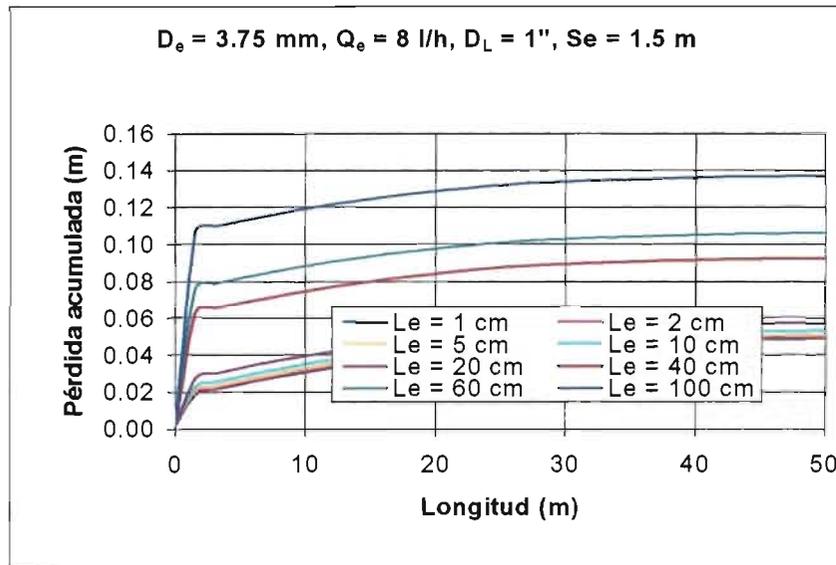
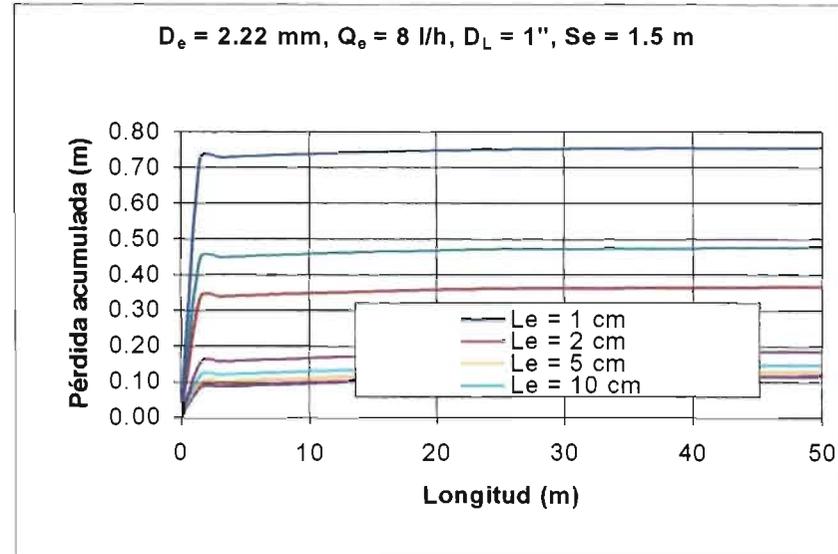
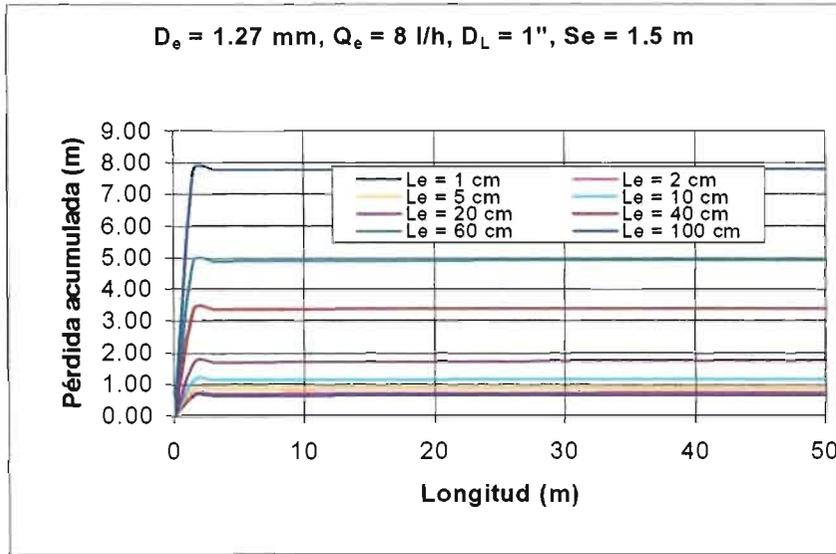


Figura 6.39. Gráficas del lateral, diámetro 1", separación de 1.5 m y gasto 8 L/h.

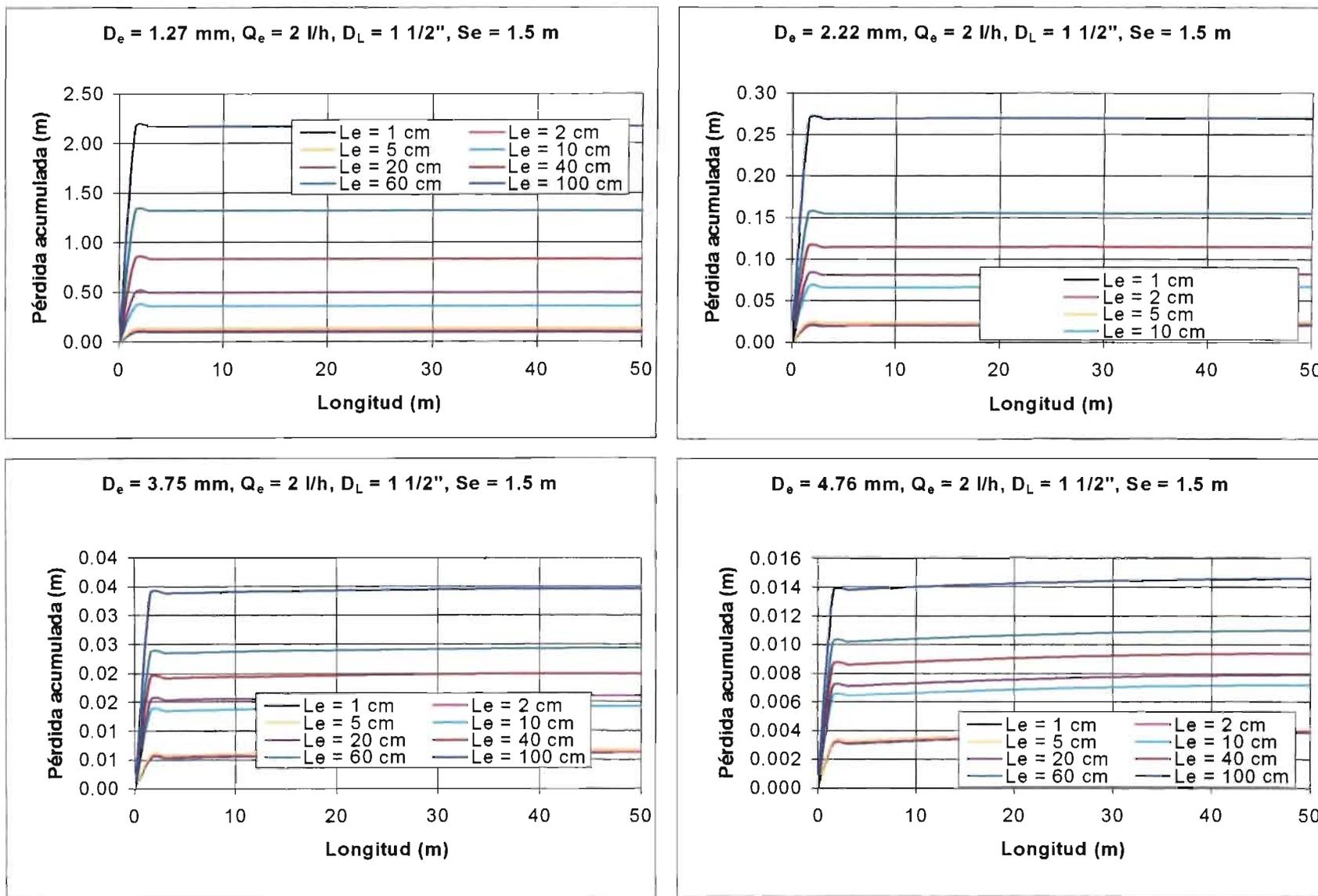


Figura 6.40. Gráficas del lateral, diámetro  $1 \frac{1}{2}''$ , separación de 1.5 m y gasto 2 L/h.

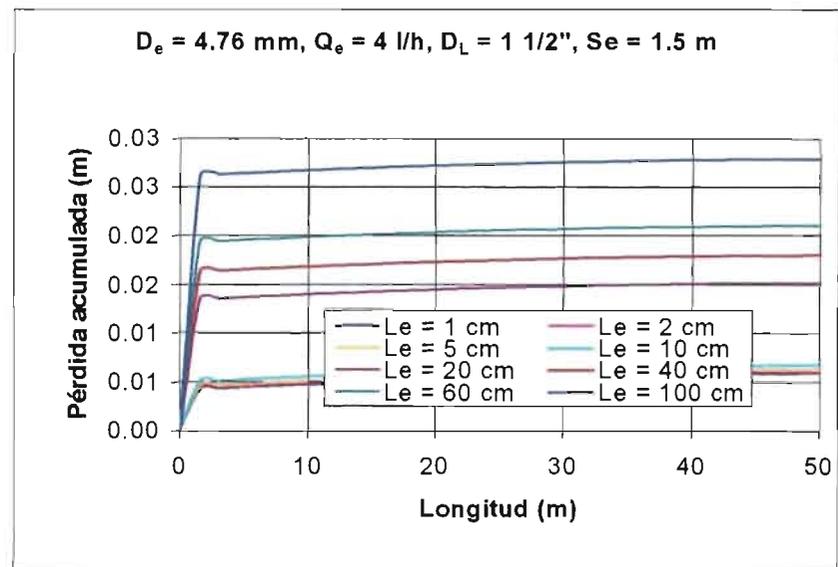
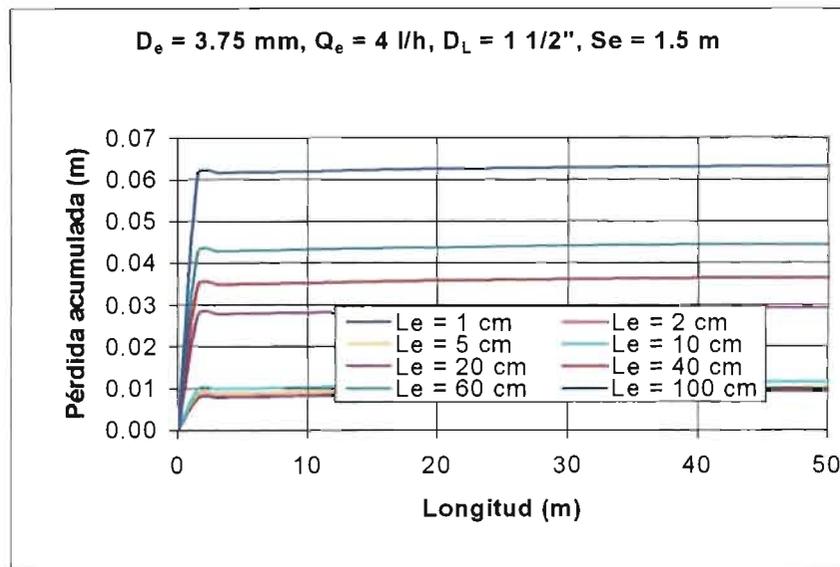
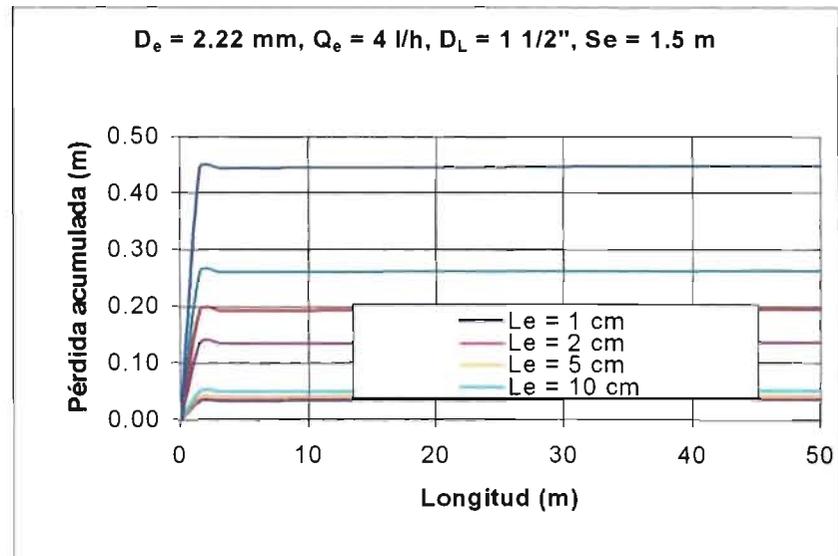
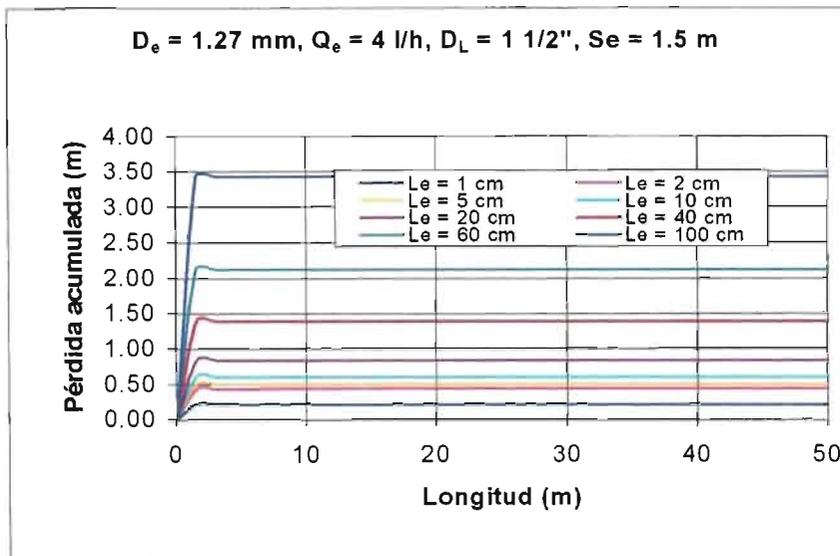


Figura 6.41. Gráficas del lateral, diámetro 1 1/2", separación de 1.5 m y gasto 4 L/h

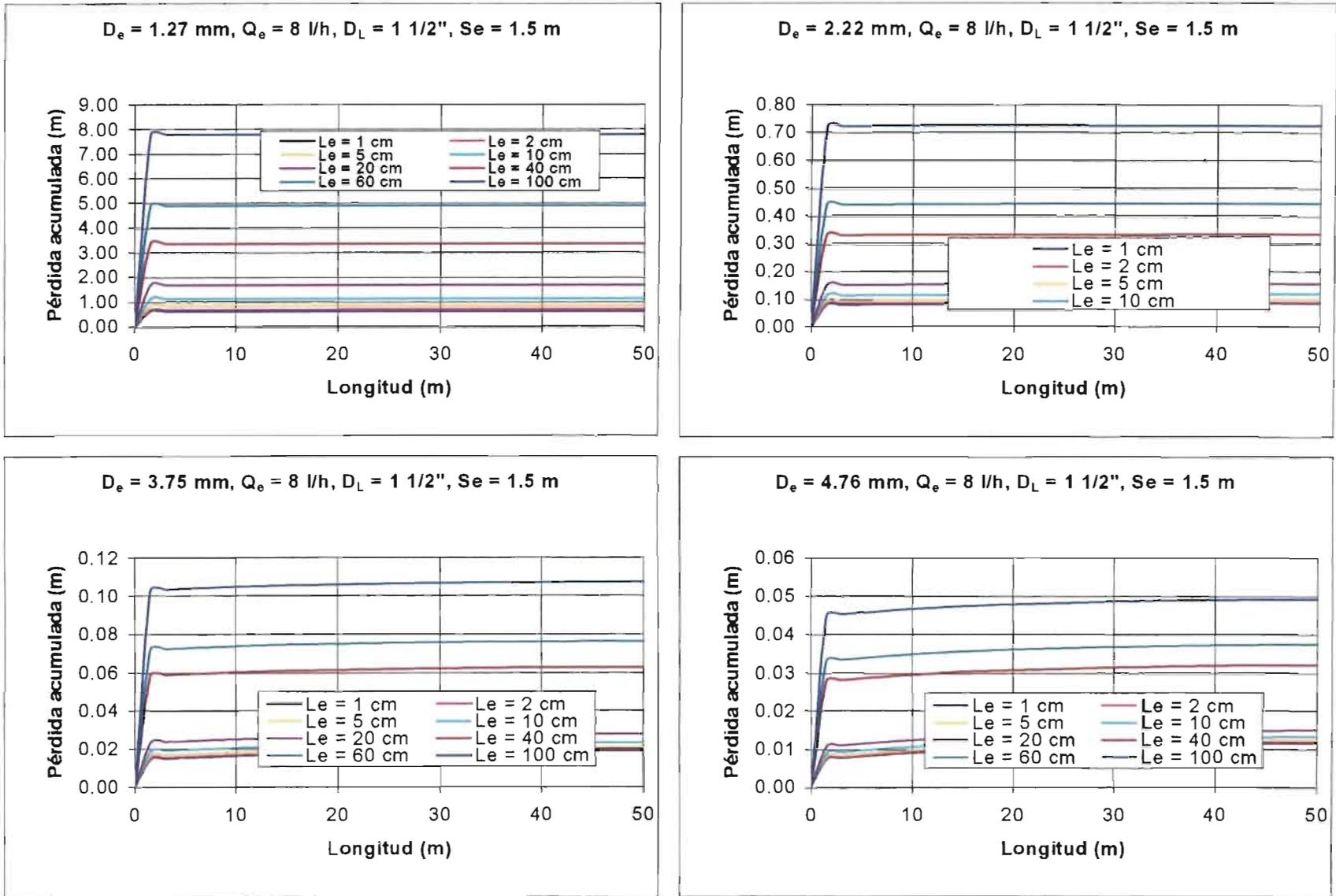


Figura 6.42. Gráficas del lateral, diámetro 1 1/2", separación de 1.5 m y gasto 8 L/h.

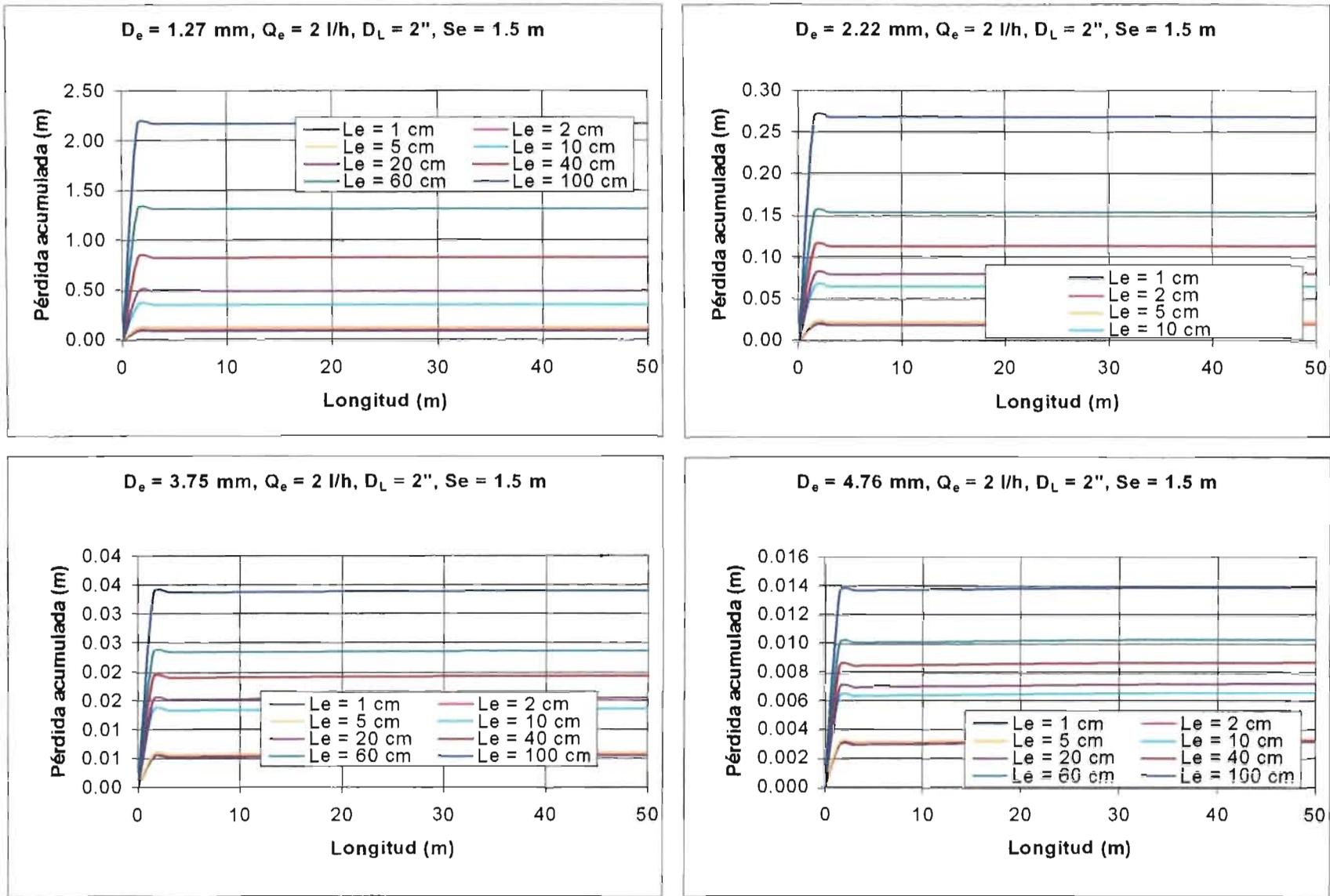


Figura 6.43. Gráficas del lateral, diámetro 2", separación de 1.5 m y gasto 2 L/h.

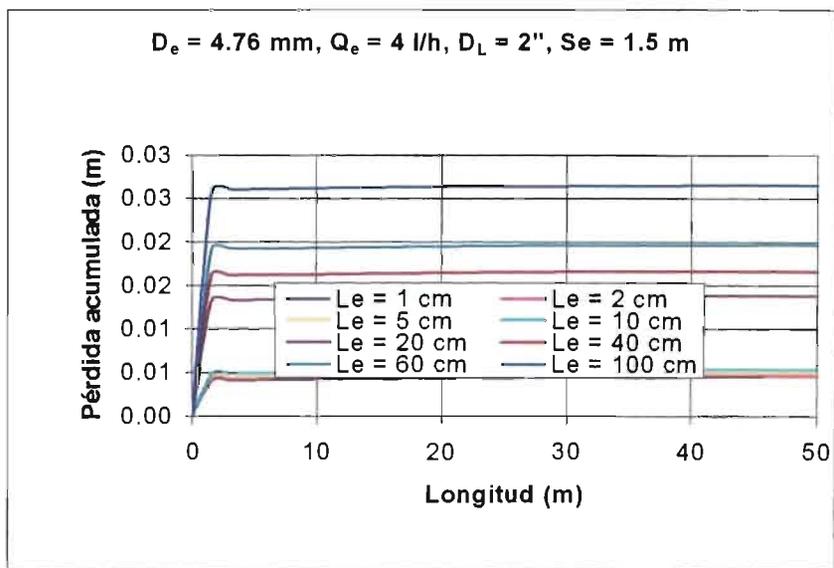
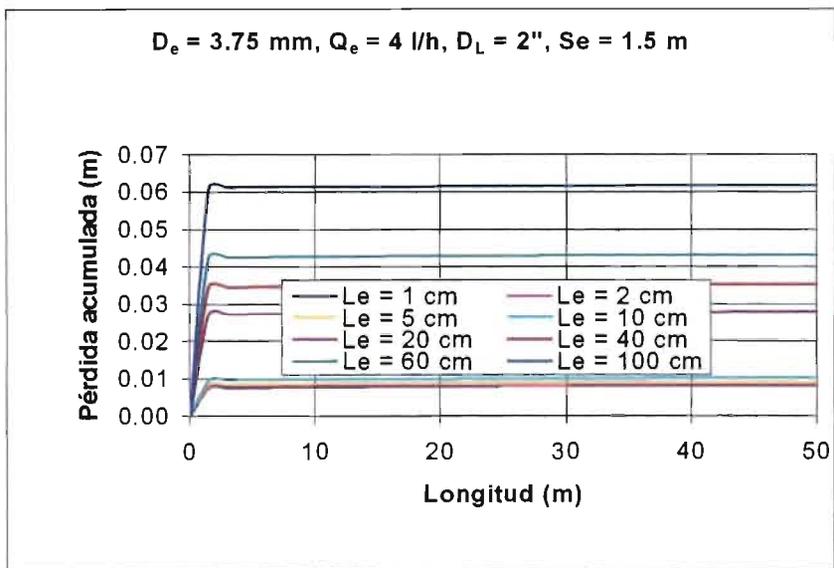
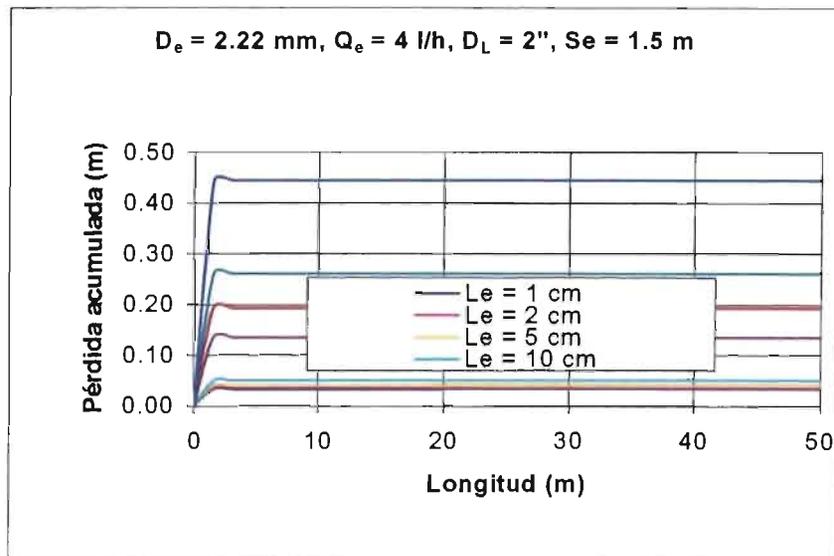
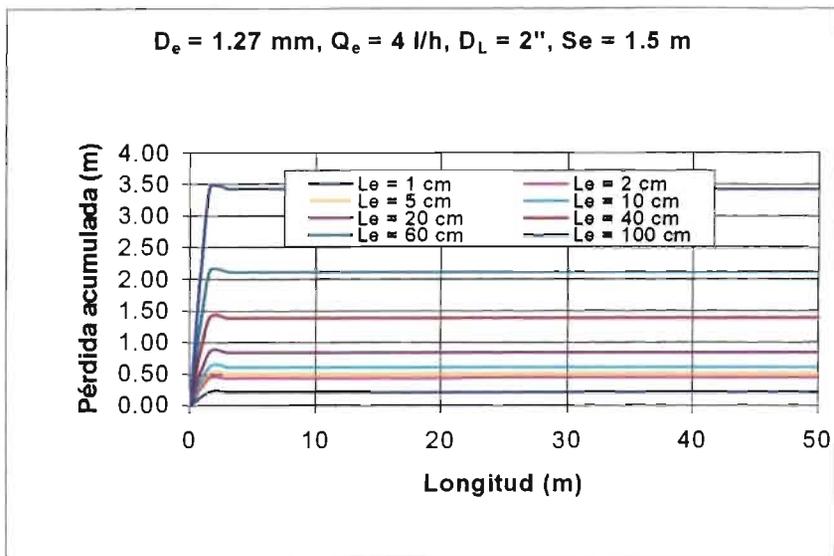


Figura 6.44. Gráficas del lateral, diámetro 2", separación de 1.5 m y gasto 4 L/h.

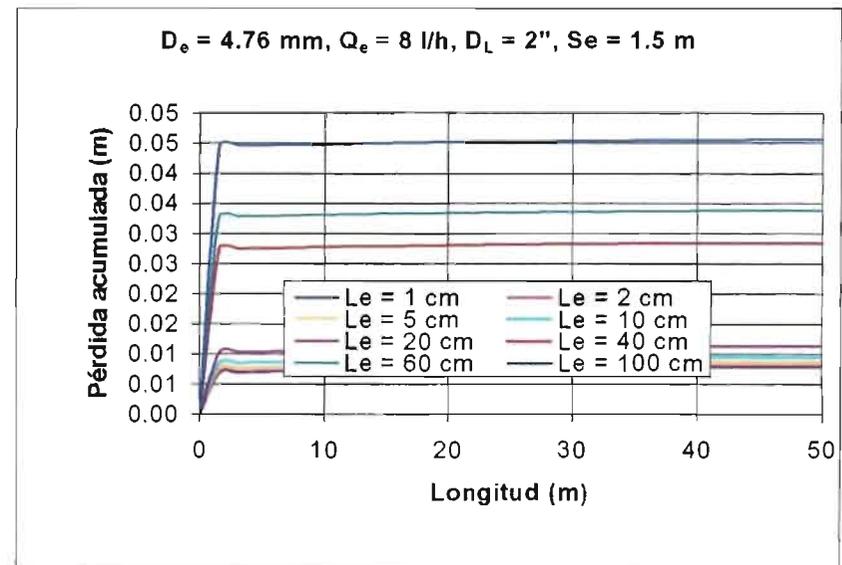
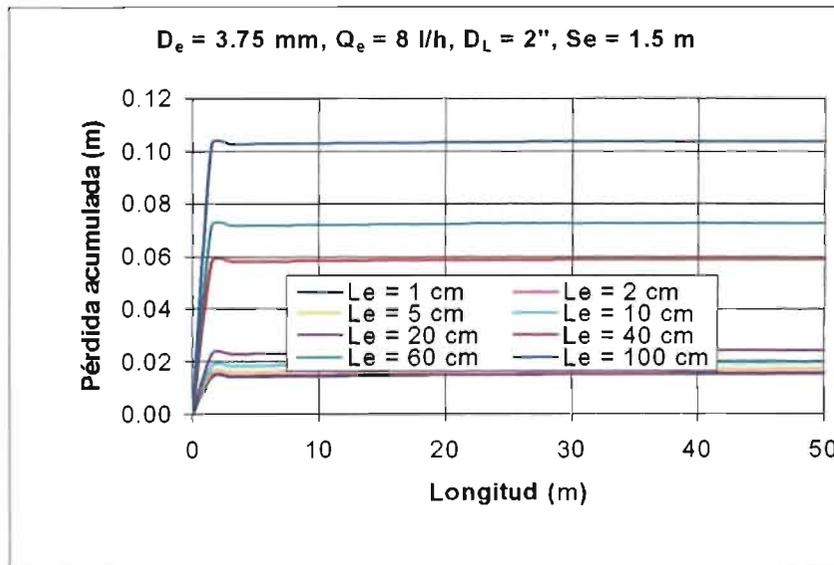
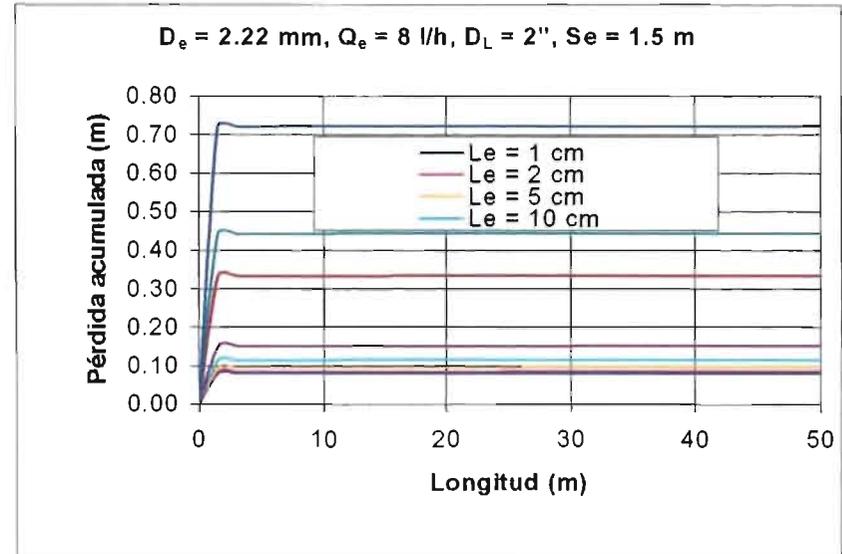
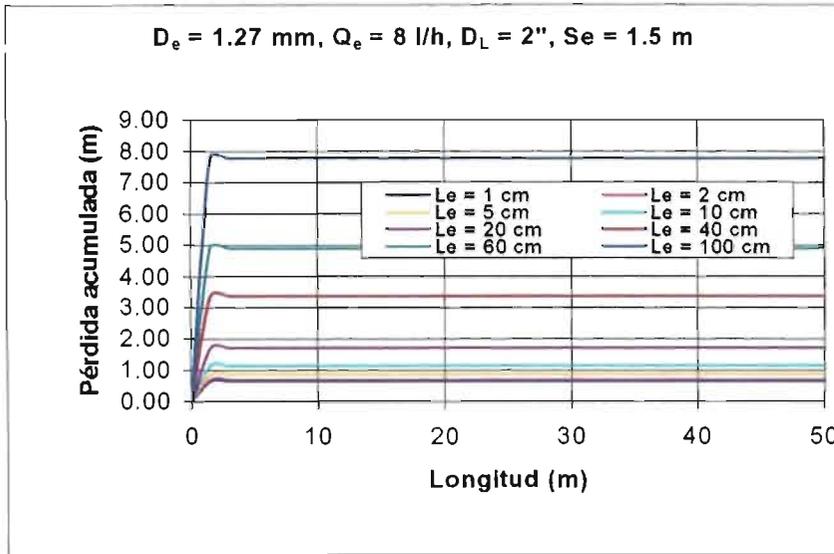


Figura 6.45. Gráficas del lateral, diámetro 2", separación de 1.5 m y gasto 8 L/h.

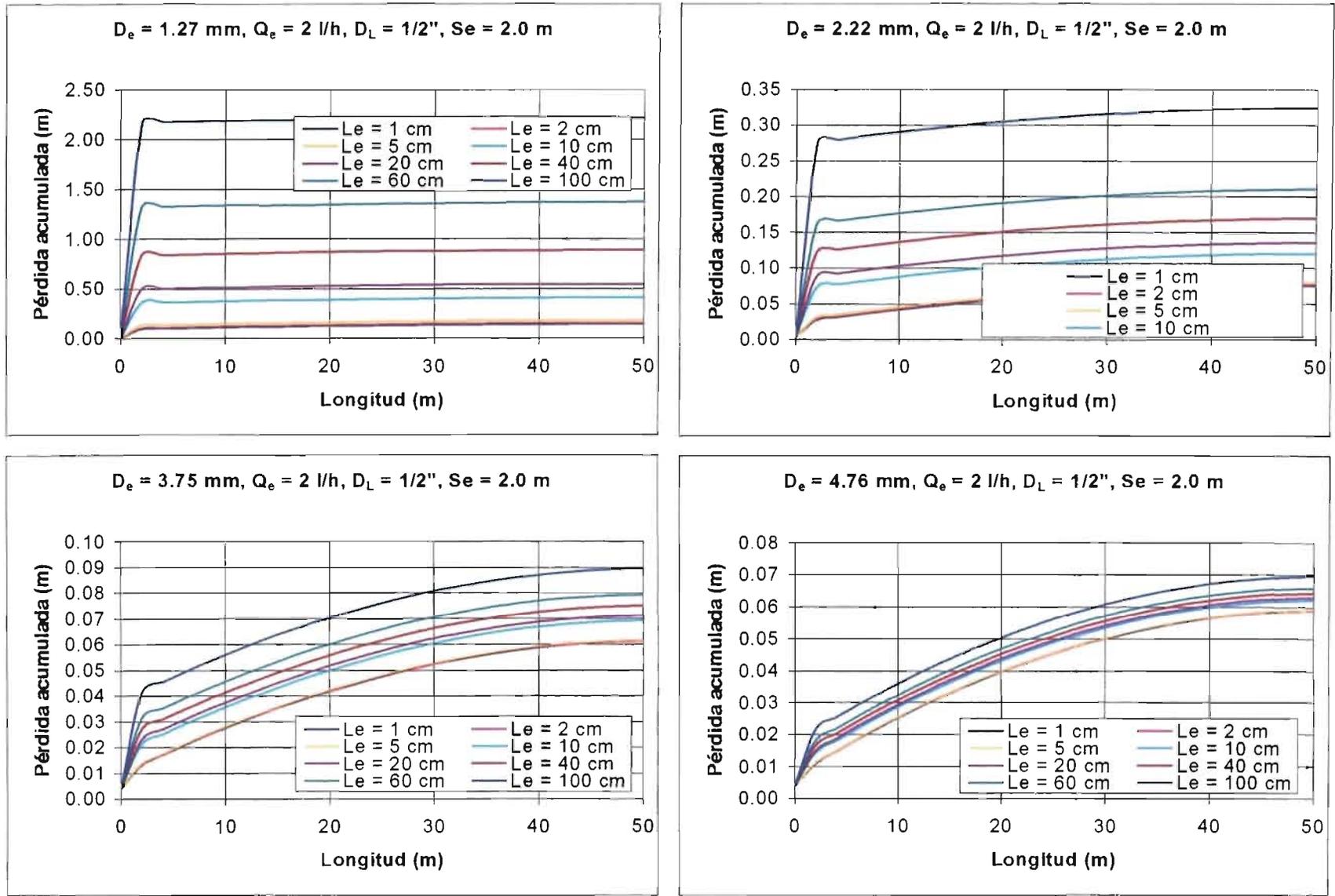


Figura 6.46. Gráficas del lateral, diámetro 1/2", separación de 2.0 m y gasto 2 L/h.

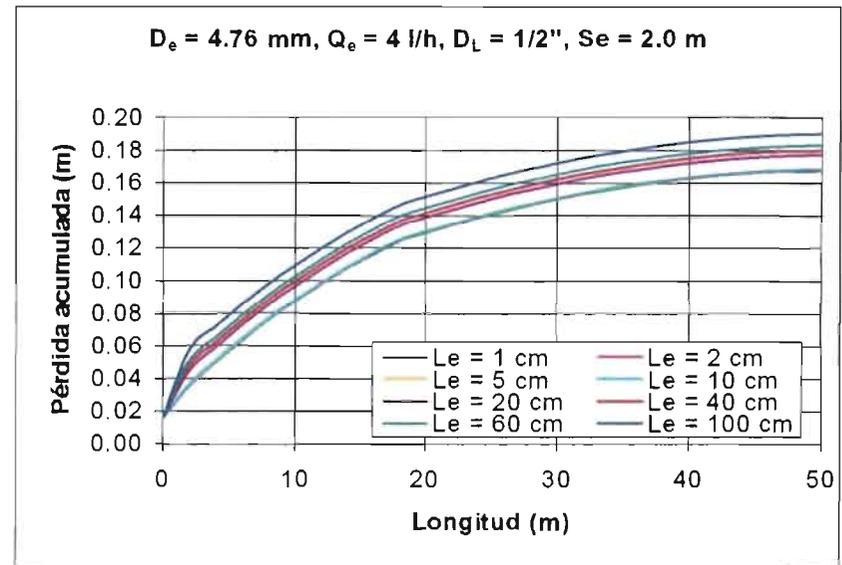
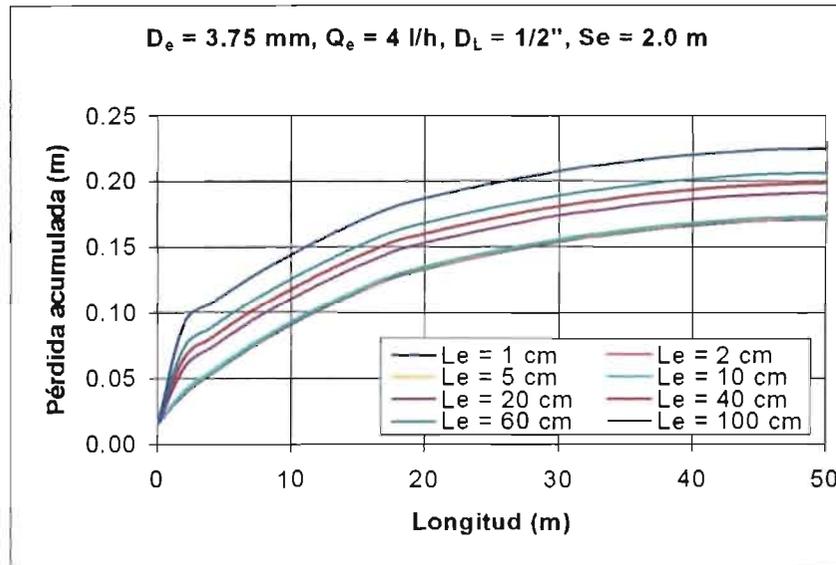
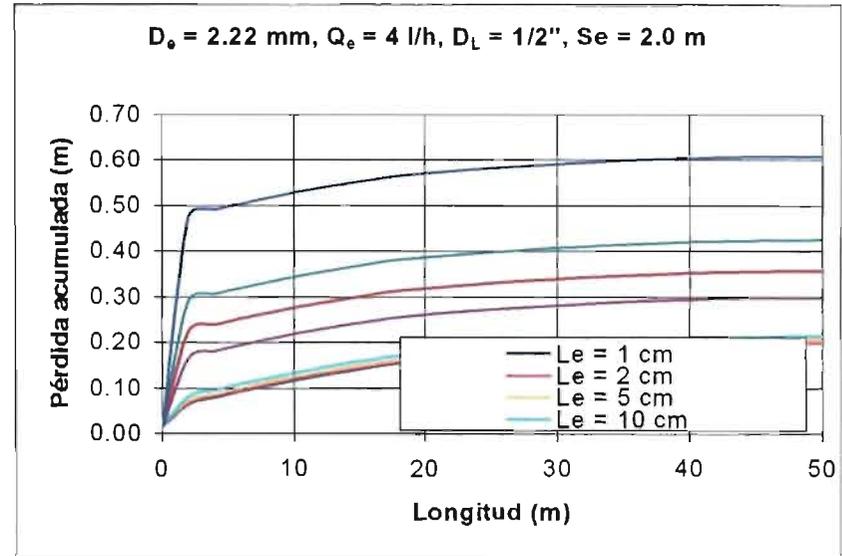
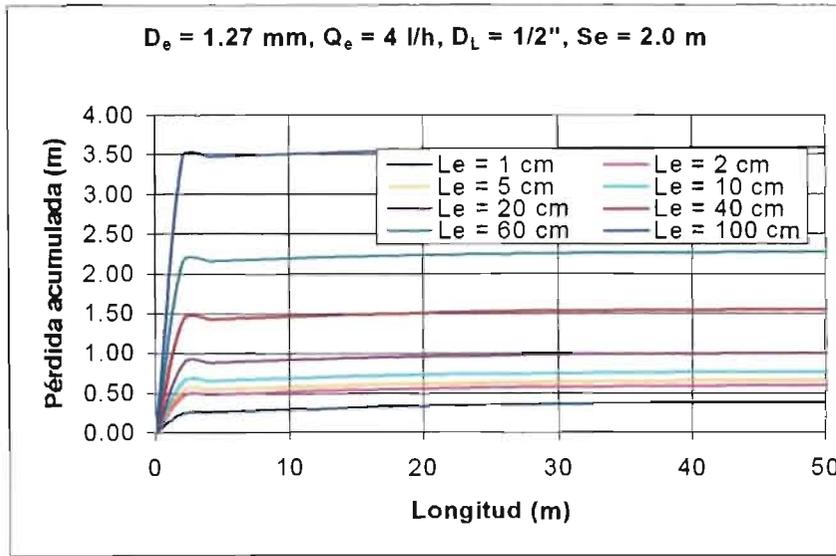


Figura 6.47. Gráficas del lateral, diámetro  $1/2''$ , separación de 2.0 m y gasto 4 L/h

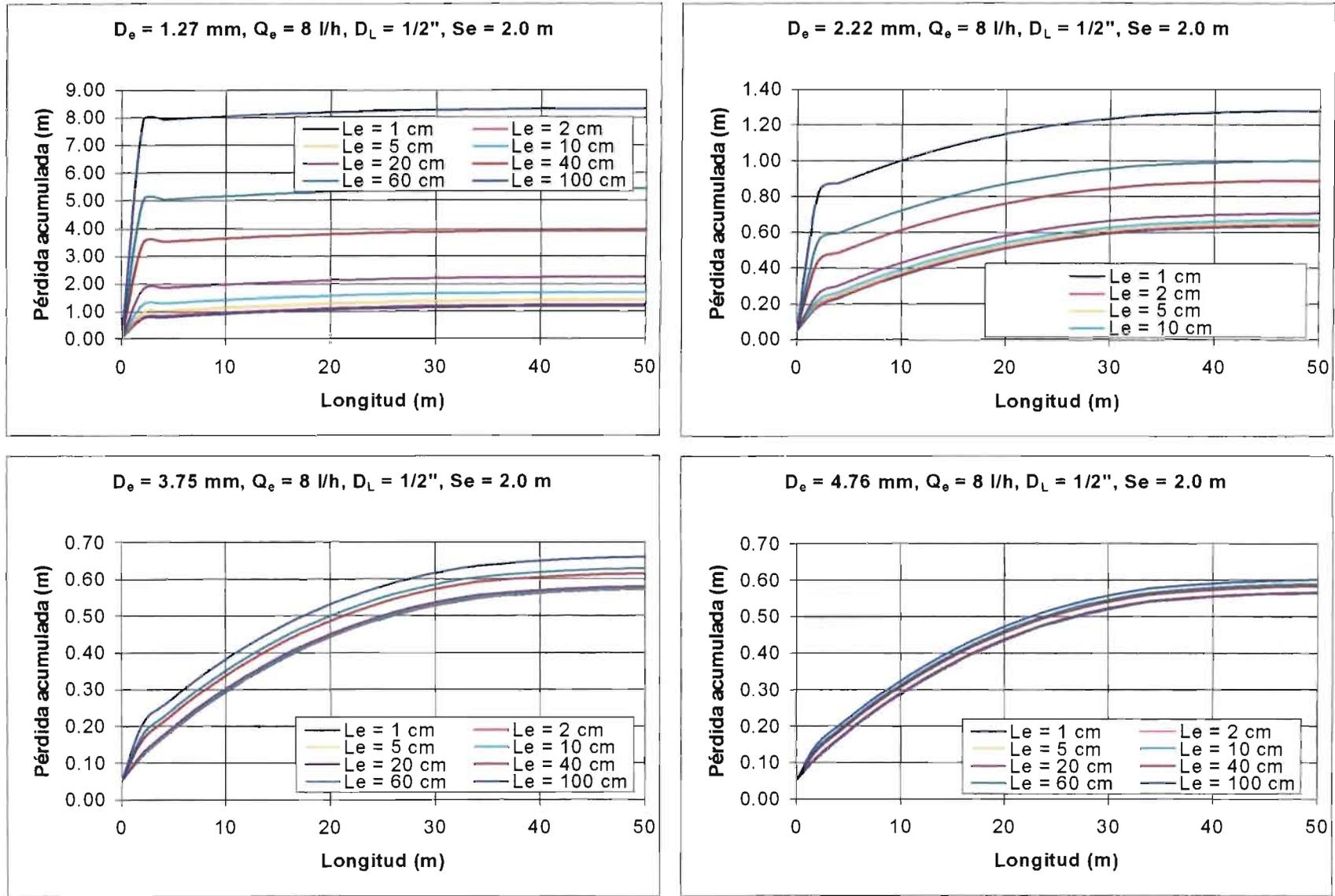


Figura 6.48. Gráficas del lateral, diámetro  $1/2''$ , separación de 2.0 m y gasto 8 L/h.

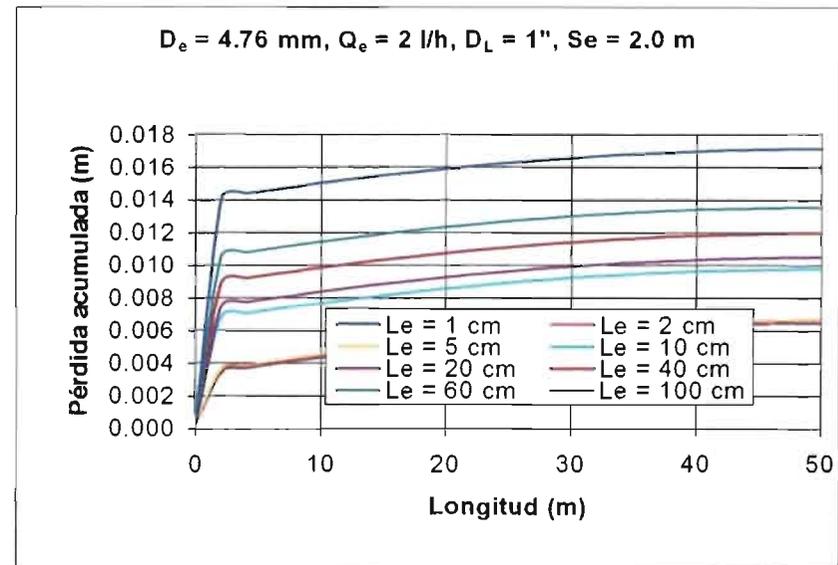
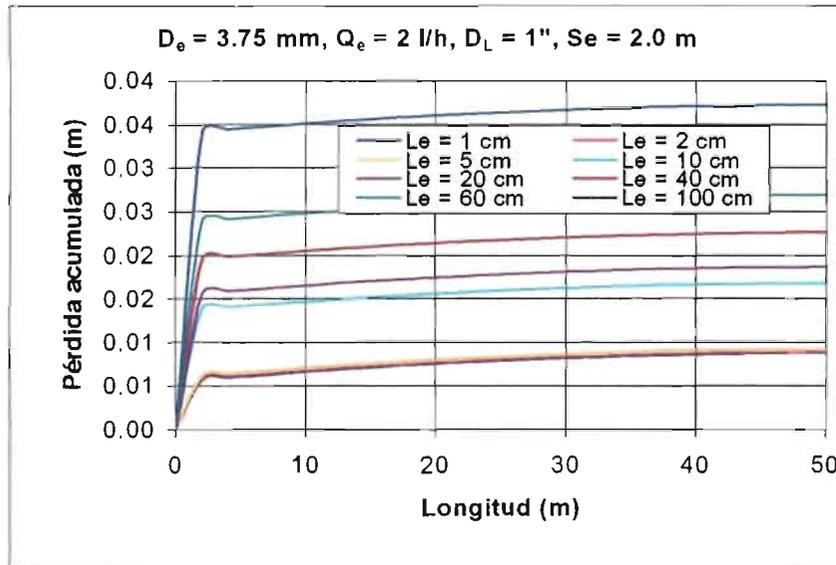
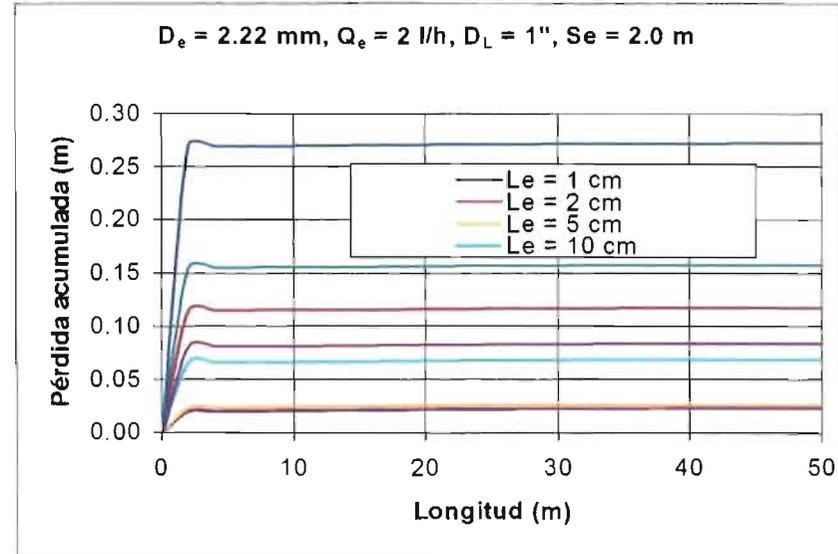
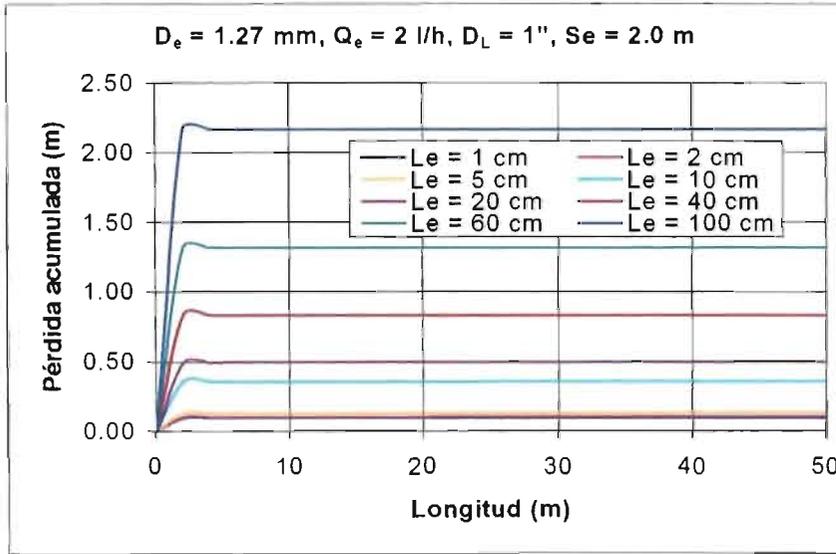


Figura 6.49. Gráficas del lateral, diámetro 1", separación de 2.0 m y gasto 2 L/h.

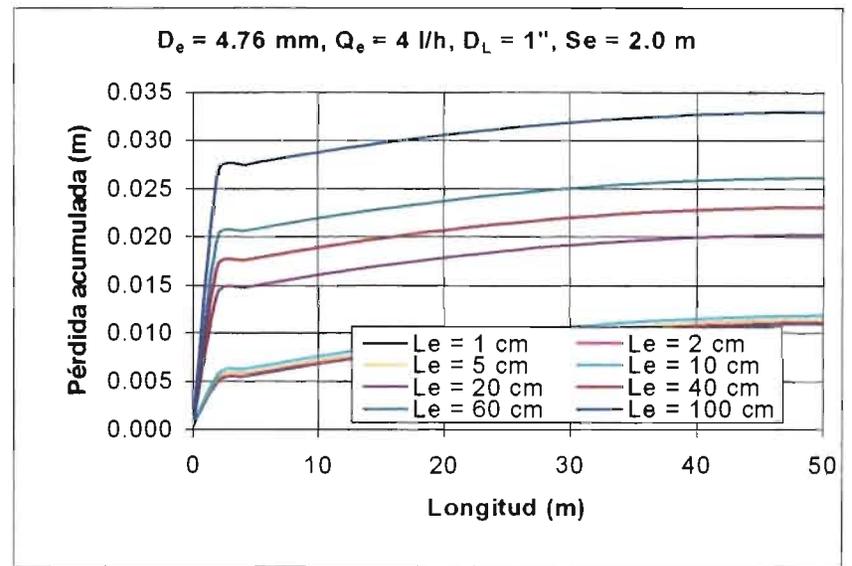
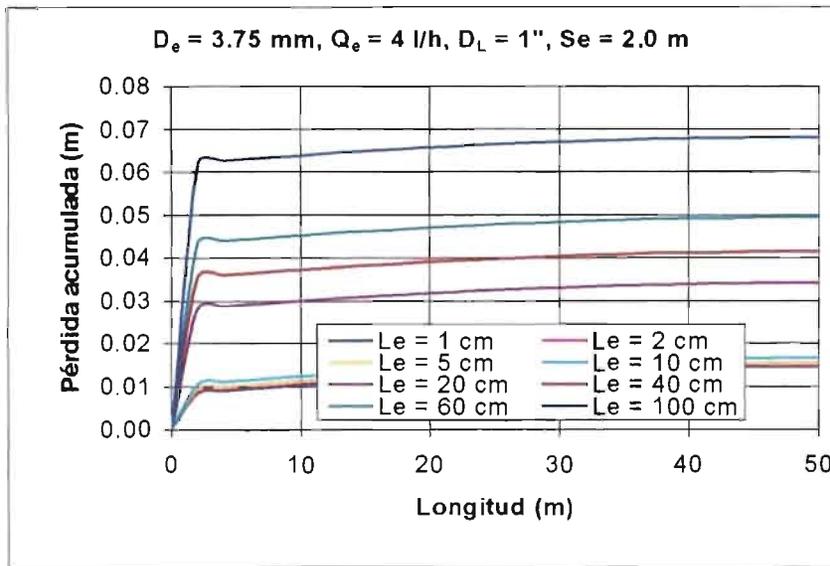
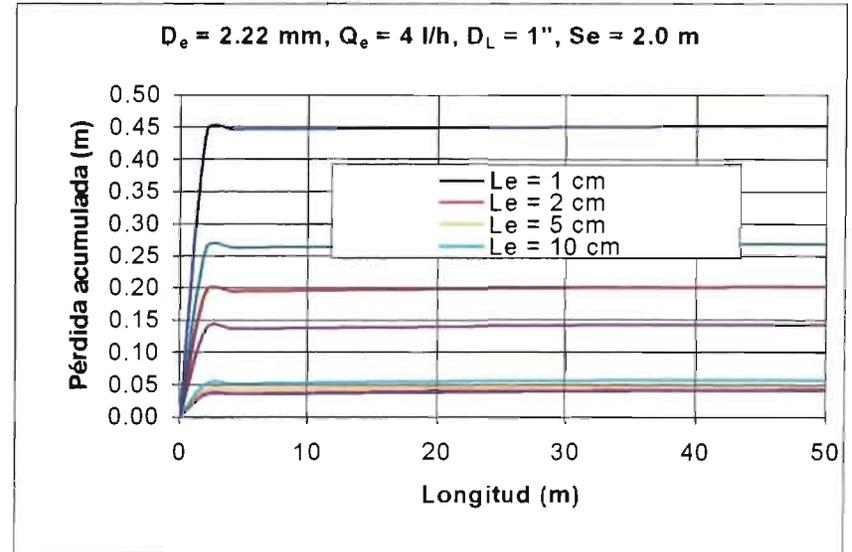
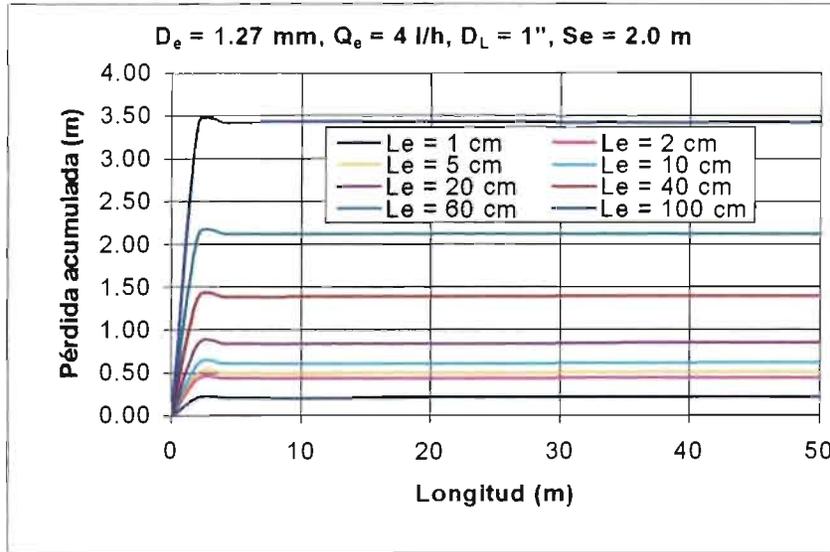


Figura 6.50. Gráficas del lateral, diámetro 1", separación de 2.0 m y gasto 4 L/h.

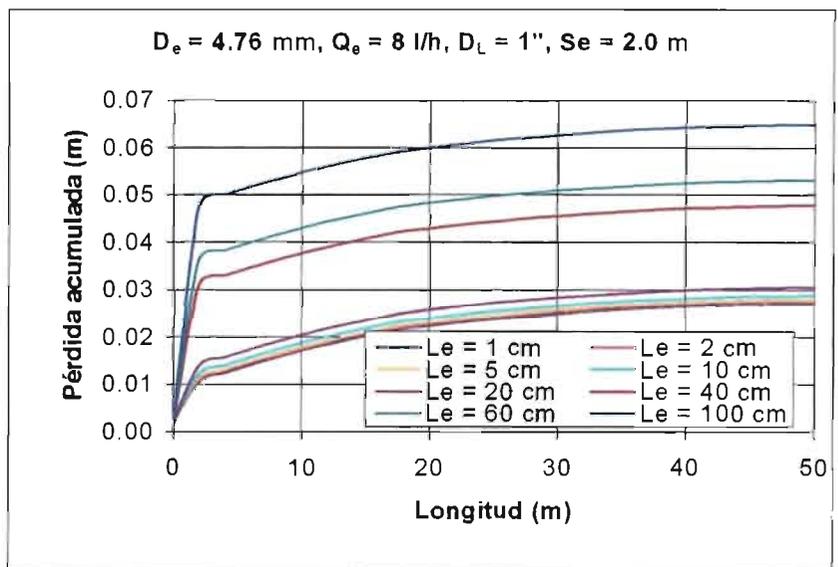
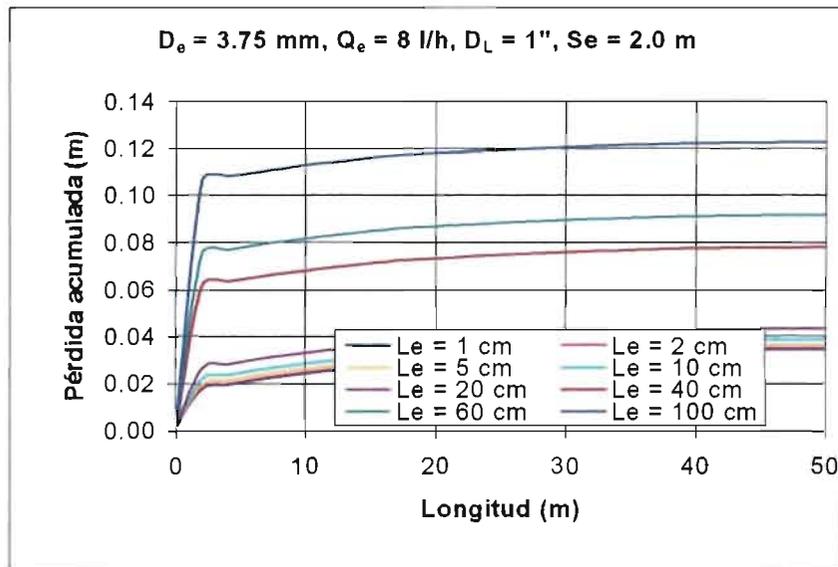
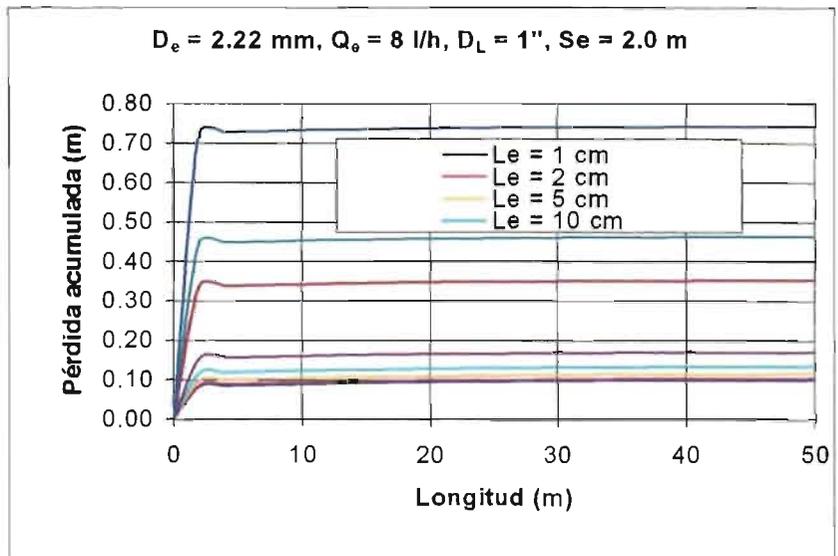
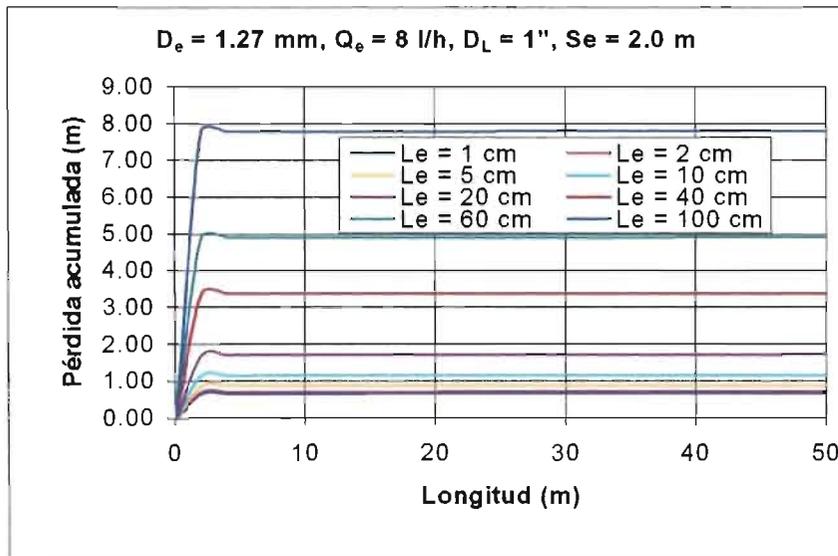


Figura 6.51. Gráficas del lateral, diámetro 1", separación de 2.0 m y gasto 8 L/h.

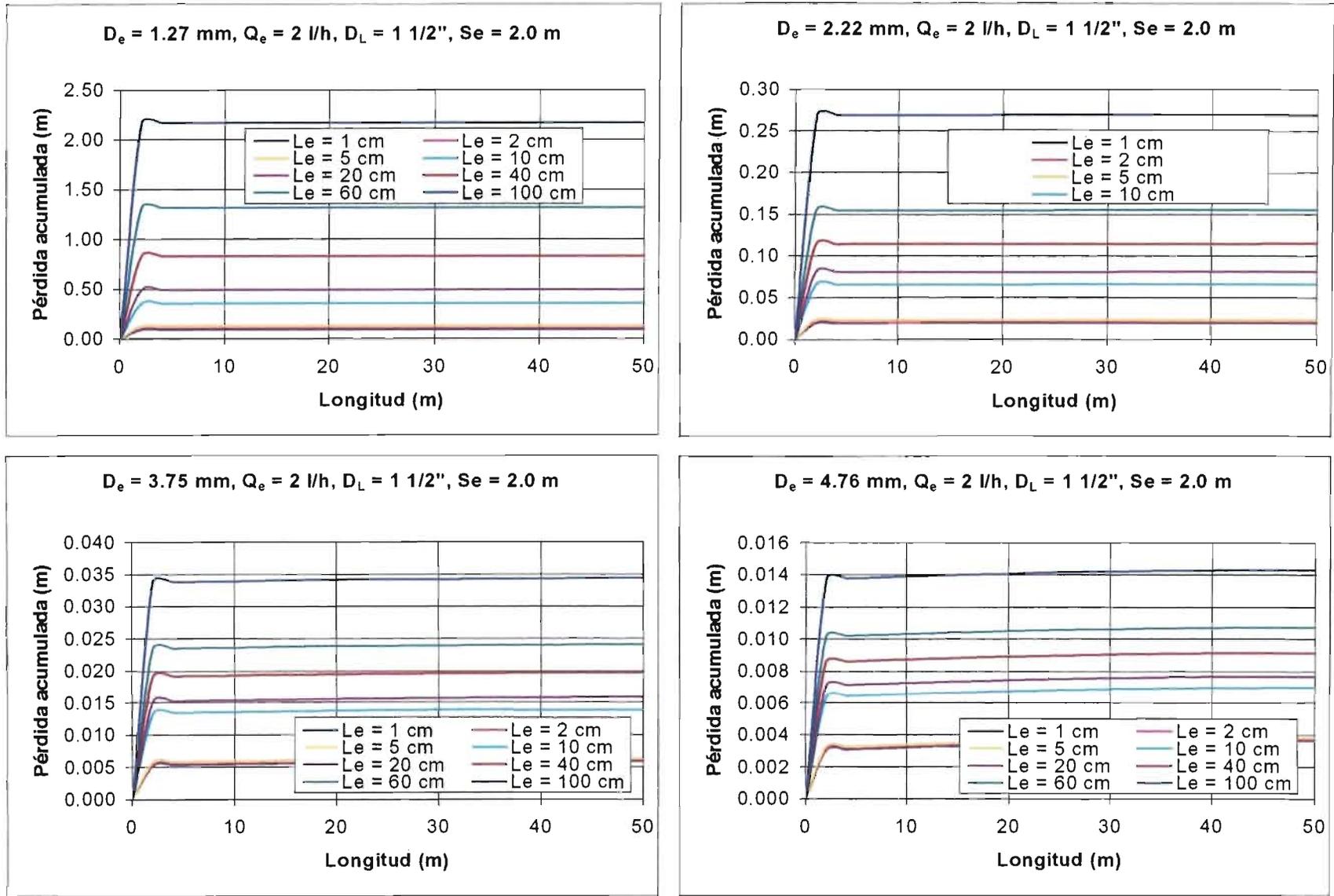


Figura 6.52. Gráficas del lateral, diámetro  $1 \frac{1}{2}''$ , separación de 2.0 m y gasto 2 L/h.

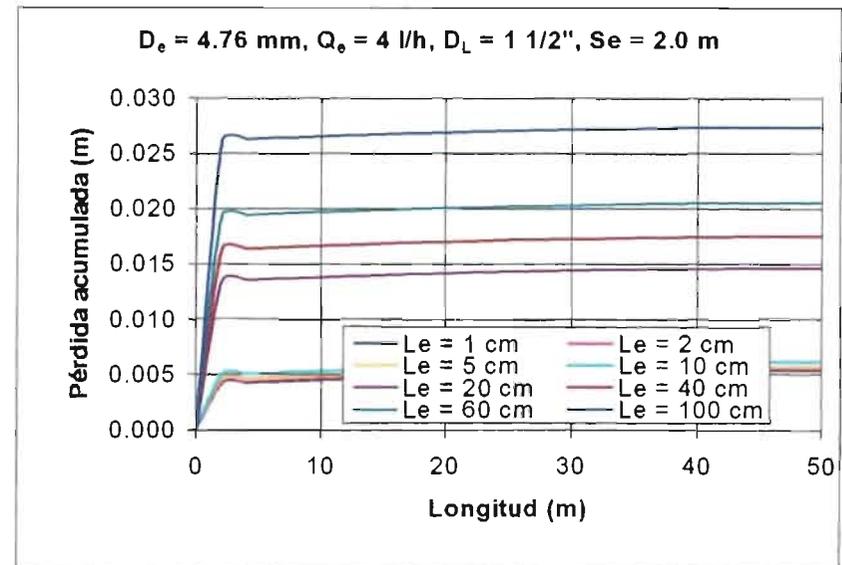
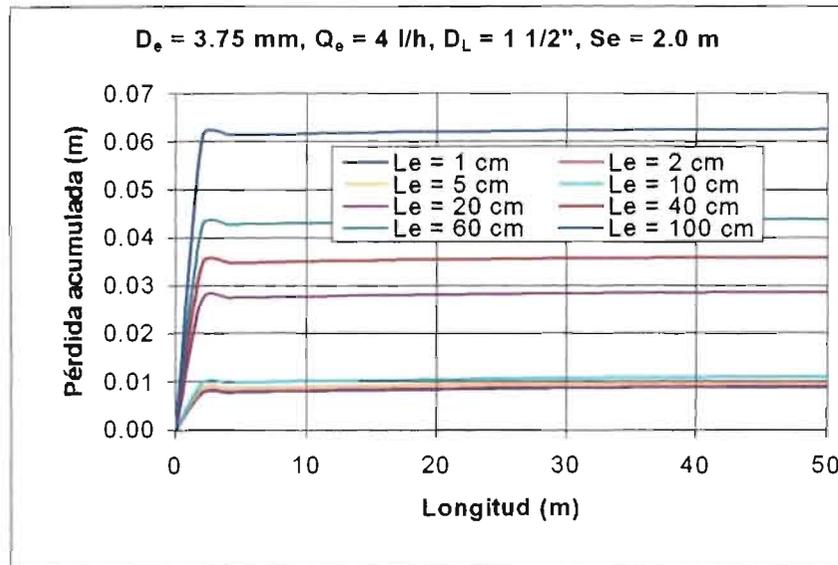
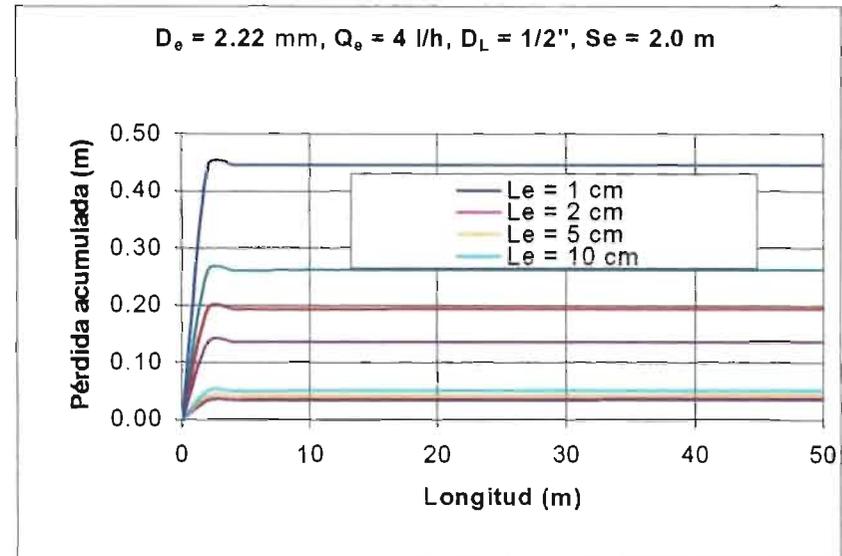
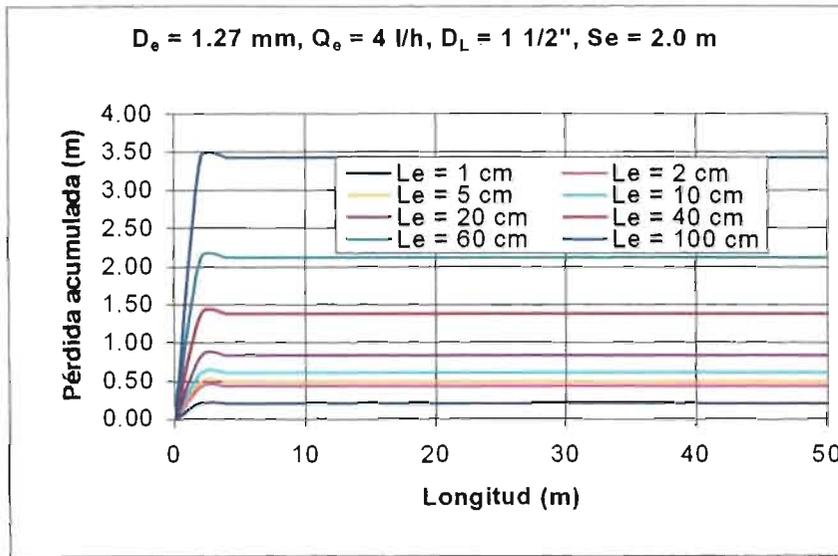


Figura 6.53. Gráficas del lateral, diámetro  $1 \frac{1}{2}''$ , separación de  $2.0 \text{ m}$  y gasto  $4 \text{ L/h}$

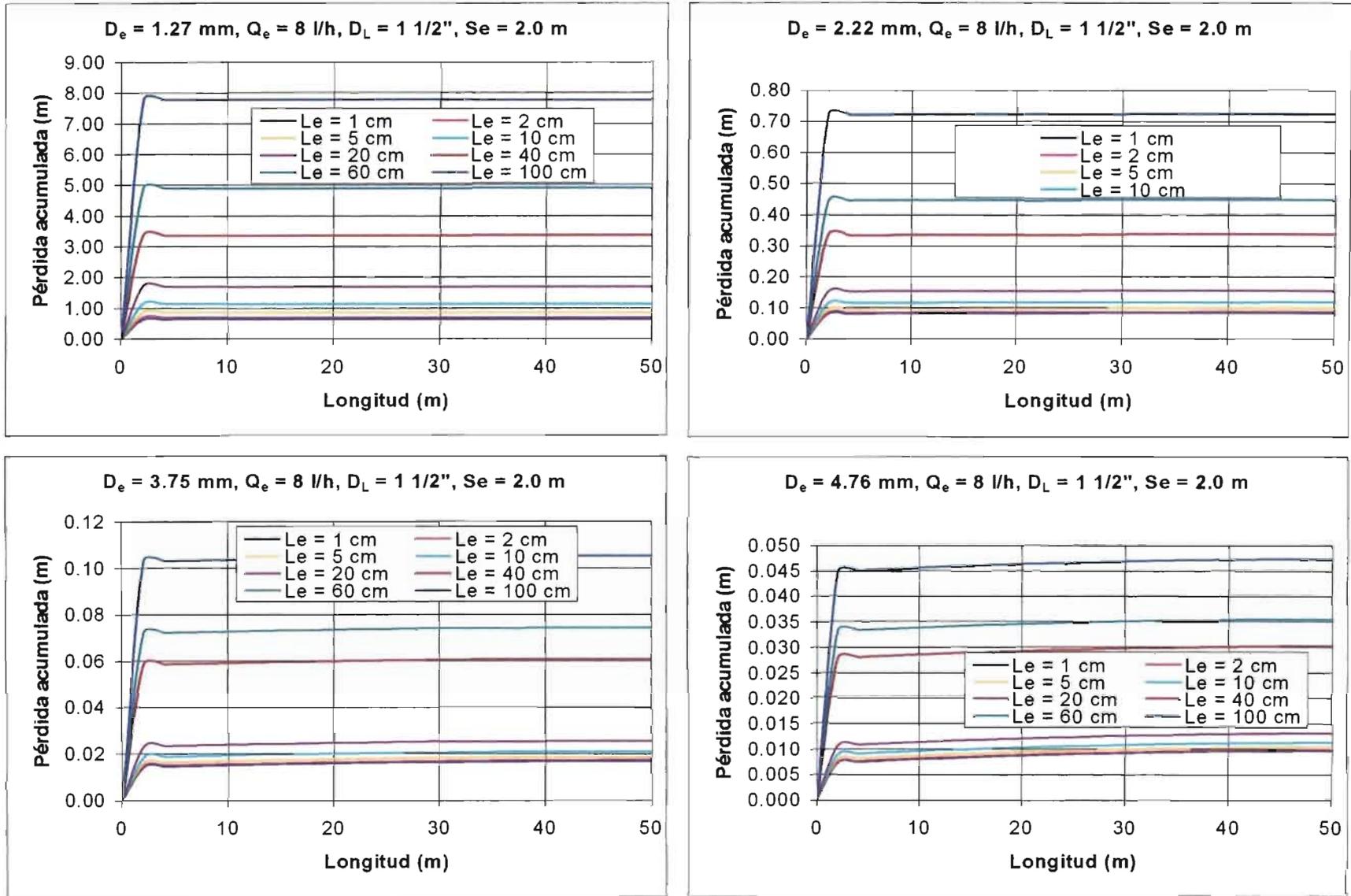


Figura 6.54. Gráficas del lateral, diámetro 1 1/2", separación de 2.0 m y gasto 8 L/h.

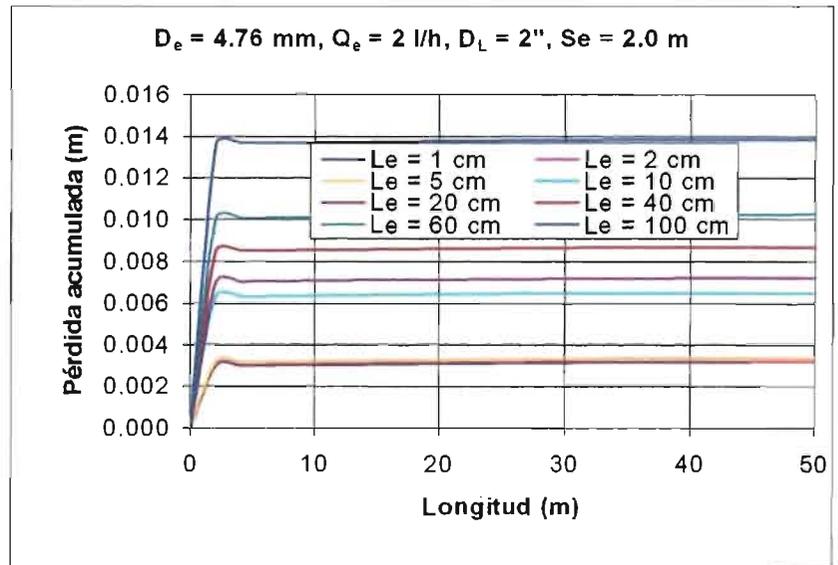
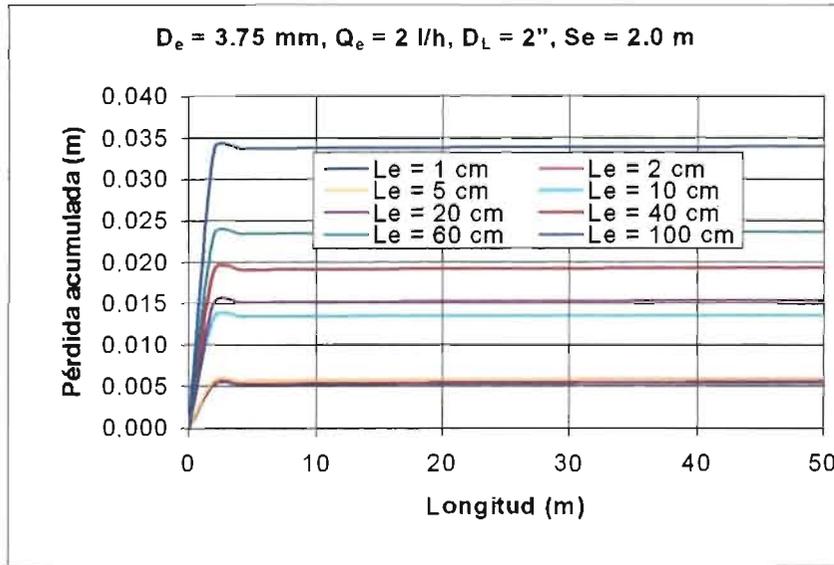
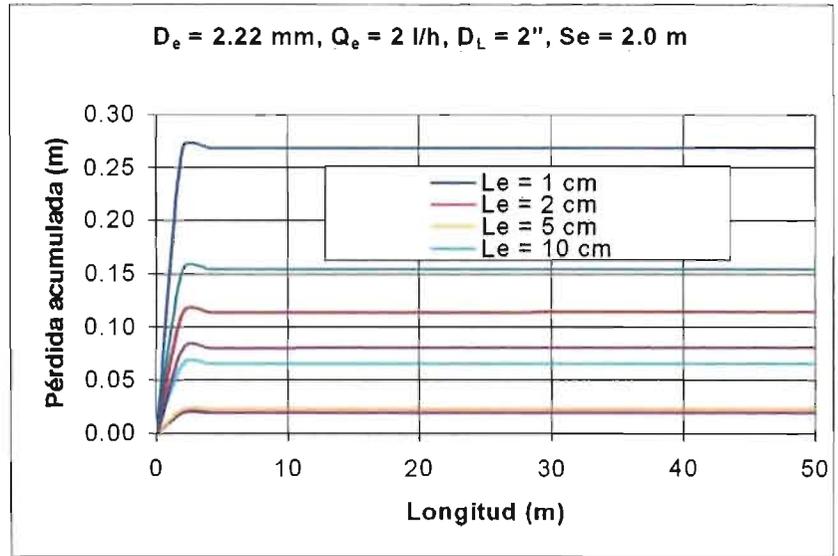
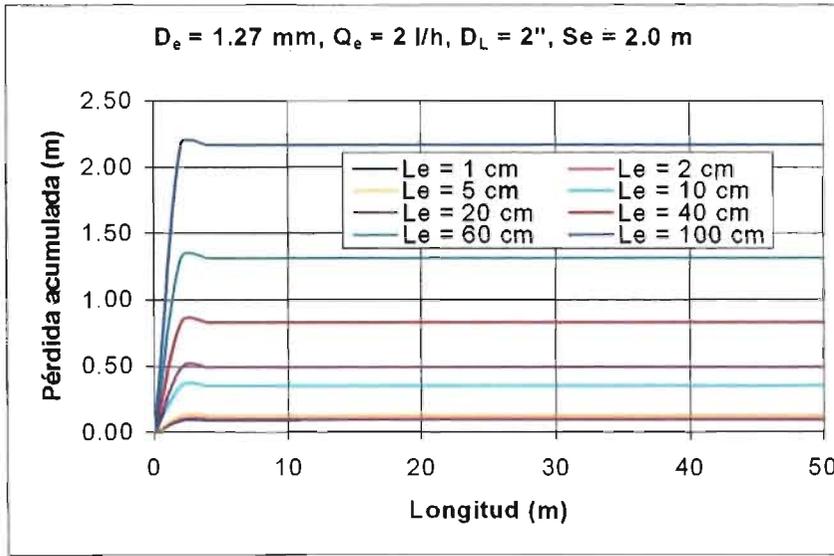


Figura 6.55. Gráficas del lateral, diámetro 2", separación de 2.0 m y gasto 2 L/h.

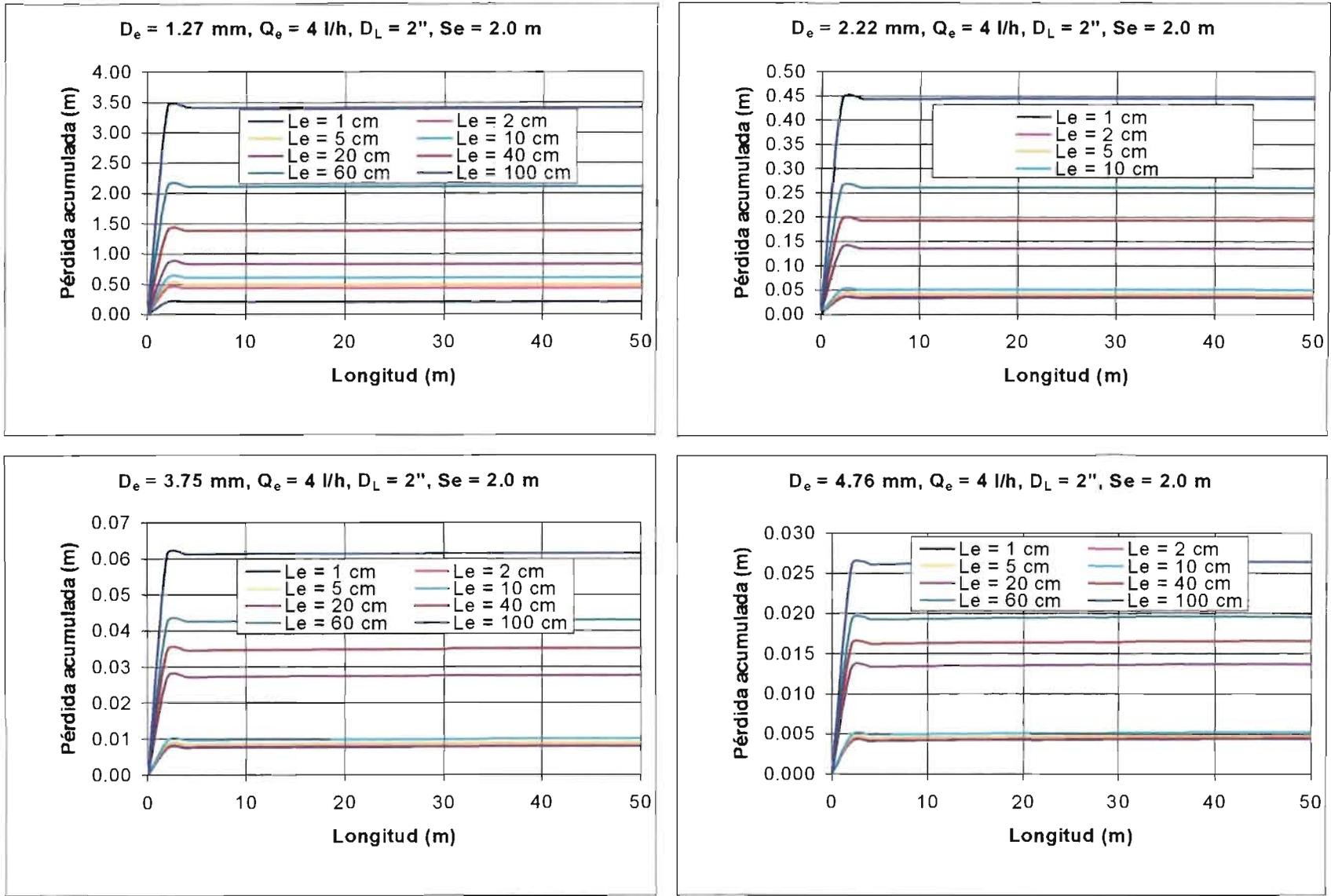
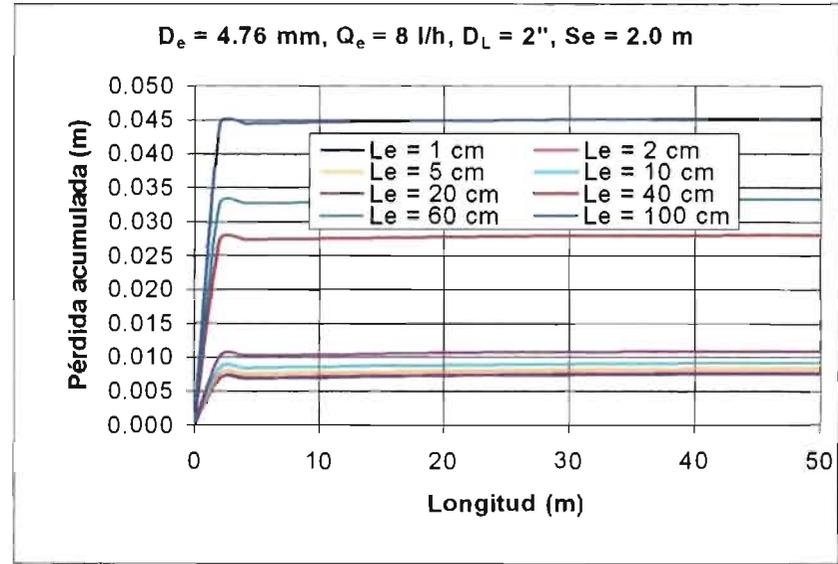
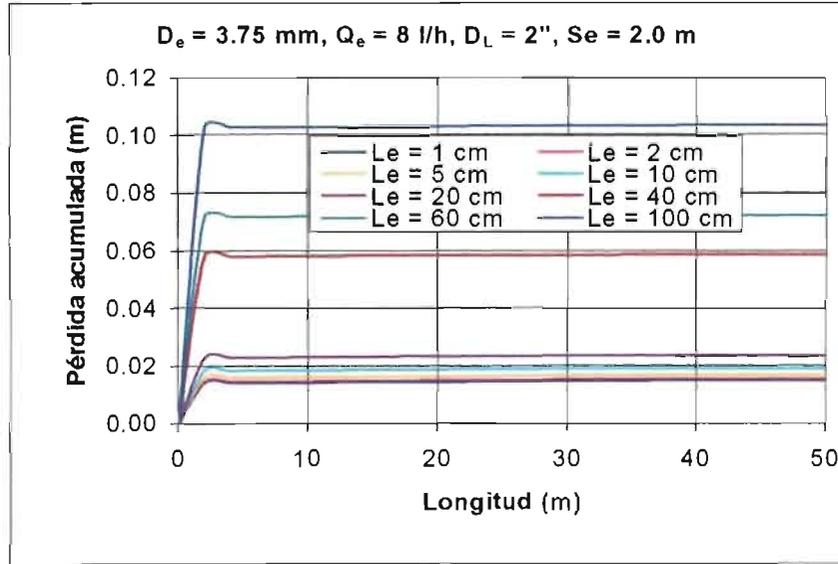
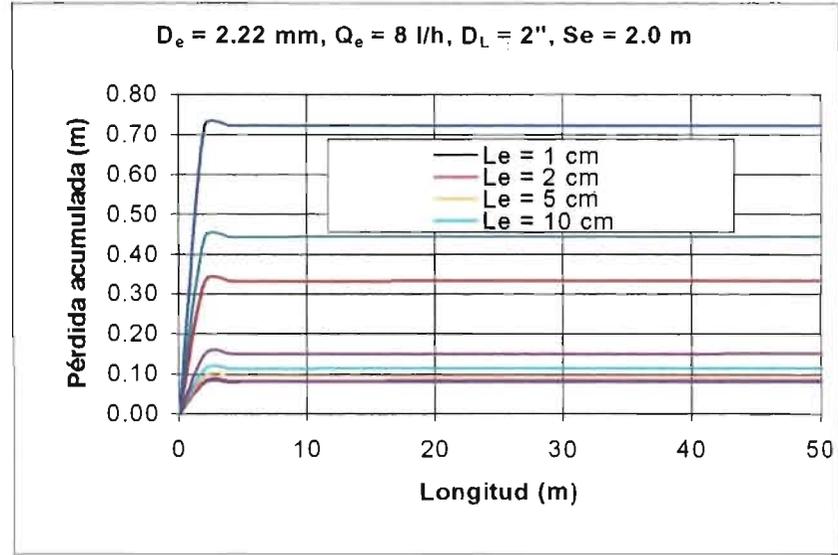
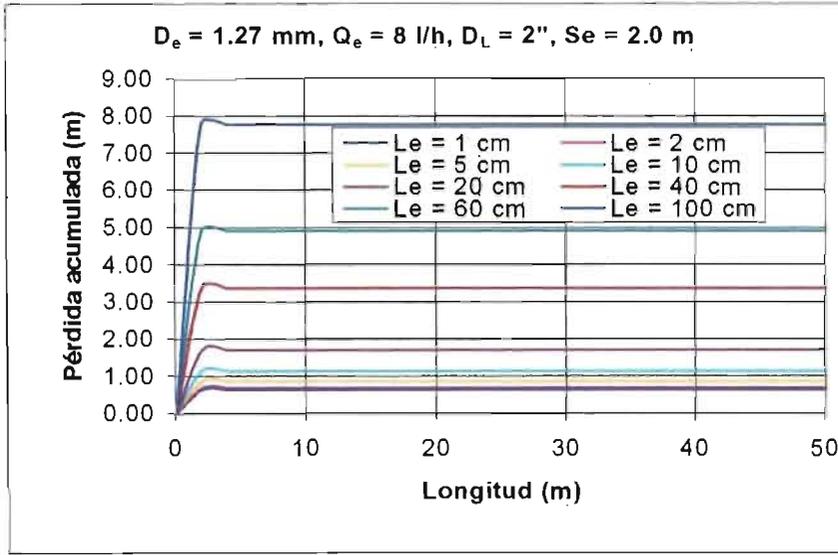


Figura 6.56. Gráficas del lateral, diámetro 2", separación de 2.0 m y gasto 4 L/h.

Figura 6.56. Gráficas del lateral, diámetro 2", separación de 2.0 m y gasto de 2.0 m y gasto 4 L/h.



## 6.4 Propuesta de un nuevo tipo de gotero

Como el gasto que descarga un emisor está relacionado con la presión hidráulica existente se propone un gotero flexible, que se cierre al aumentar, ligeramente, la presión y se abra al reducirse esta.

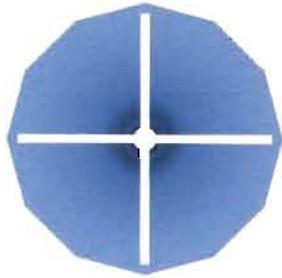
Lo anterior se puede cumplir con un material elasto-plástico (elastómero) y una geometría adecuada. Además, debe cumplir con la función de no variar en gran medida con la temperatura, ya que el sistema de riego se utiliza en varios lugares con diversas temperaturas.

Un elastómero es definido como un material polimérico que puede ser alargado al doble de su longitud original como mínimo antes de que las fuerzas de alargamiento sean removidas. Algunas veces se alargan 10 veces de su longitud original.

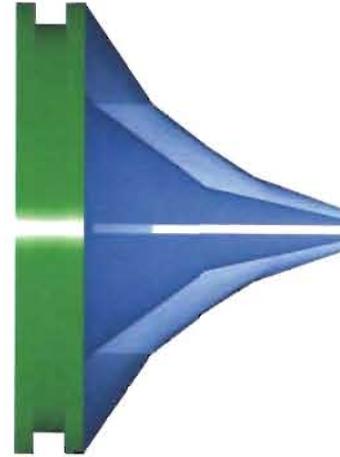
Los elastómeros tienen una capacidad de energía abundante, por eso son capaces de retornar varias veces a su longitud original. Tienen una estructura molecular amorfa similar a la que tienen otros materiales poliméricos.

La American Society for Testing Materials (ASTM) define a los elastómeros en ASTM D1566-66T como material macromolecular que retorna rápidamente a su dimensión original y antes de la deformación substancial.

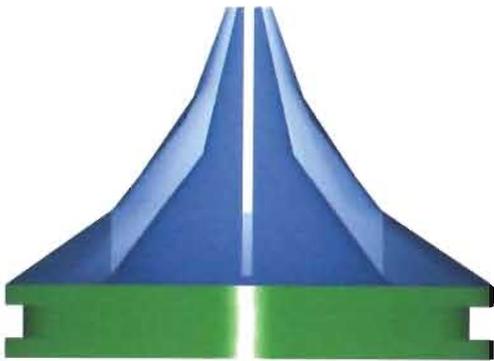
En la figura 6.58 se muestra un diseño propuesto.



**PLANTA**



**PERFIL**



**PERFIL**



**ISOMÉTRICO**

Figura 6.58. Diseño del gotero.

## **7. MANUAL DE USUARIO**

Para facilitar la utilización del Riego Presurizado de Baja Carga, RPBC, aquí desarrollado; a continuación se propone un esquema de manual del usuario.

### **7.1 Levantamiento del predio**

Hacer un estudio topográfico del terreno, en una escala adecuada para una mejor interpretación del mismo. Los datos que se consignan son:

- a) Forma del predio, estableciendo límites.
- b) Curvas de nivel, es decir las distintas líneas que unen los puntos de igual nivel, de las cuales se deducen las variaciones en la pendiente del terreno.
- c) Evaluación de las longitudes y de los gradientes del lote y de las facilidades de acceso a las fuentes de agua y otros abastecimientos.

### **7.2 Selección del cultivo y sus necesidades de agua**

En esta etapa intervienen especialistas agrónomos que deben considerar, entre otros, los aspectos siguientes:

#### **7.2.1 Aspectos relacionados con los cultivos**

O sea las características del cultivo o cultivos y sus respectivas necesidades de riego tanto en cantidad como en tiempo de aplicación.

#### **Evapotranspiración**

La evapotranspiración (ET), se entiende como la suma de la evaporación (E) del agua, contenida tanto en el suelo como en la superficie de las plantas, más la transpiración (T) de los cultivos.

#### **Punto de marchitamiento permanente (PMP)**

A medida que va disminuyendo el nivel de humedad del suelo, el agua es retenida con mayor fuerza por éste, las plantas tienen cada vez mayor dificultad para extraerla y llega un momento en que la planta es incapaz de extraer más agua y comienza a marchitarse. Este nivel depende de las características del suelo, así como de las especies vegetales para un mismo suelo. Se suele expresar en porcentaje (%) de volumen o masa, siendo válida la

recomendación hecha sobre la naturaleza de este parámetro en el caso de la capacidad de campo.

### **Profundidad radicular**

Se entiende por profundidad radicular, como la profundidad media que alcanza la masa radicular efectiva del cultivo. El crecimiento en profundidad del sistema radicular no es fácil de establecer a priori, dado que depende de factores tan variables como el clima, el suelo y el tipo de cultivo. La duración del ciclo vegetativo de la planta influye sobre el desarrollo en profundidad de la raíz. Así aquellos cultivos cuya maduración requiere sólo dos meses, penetran de 60 a 90 cm, los que requieren 3 o 4 meses, penetran de 90 a 150 cm; y aquellos con ciclos de hasta 6 meses, alcanzan profundidades entre 180 y 300 cm. En general, puede estimarse que, aproximadamente, el sistema radicular profundiza de 30 a 45 cm por cada mes de desarrollo activo, los valores de profundidad radicular se presentan en la tabla A.1 para cada cultivo en el Anexo A.

### **Descenso tolerable de humedad**

Al regar un cultivo no sólo se persigue la supervivencia de éste, sino que se pretende que produzca unos rendimientos elevados. Por ello, debe tenerse en cuenta, que antes de que el descenso del contenido de humedad alcance el punto de marchitamiento, se pasa por un punto de mayor humedad, a partir del cual el cultivo comienza a realizar un esfuerzo excesivo para absorber agua del suelo y que por consecuencia se afecta su rendimiento. La cantidad de agua entre la capacidad de campo y este punto, ahora definido, corresponde a lo conocido como humedad fácilmente utilizable por las plantas, y puede ser consumida por ellas sin quedar sometidas a un esfuerzo inadecuado. Desde este nivel de humedad hasta el de marchitamiento, el cultivo puede extraer agua para su supervivencia, pero su desarrollo vegetativo y radicular se verá frenado.

### **7.2.2 Agua a utilizar y cuando regar**

En términos generales se puede decir que tanto la escasez como la abundancia de agua en la zona radicular producen efectos indeseables en los rendimientos y calidad de las cosechas y desperdician el agua que puede necesitarse para otros fines o en otras partes. De aquí que sea sumamente importante aplicar el agua necesaria para humedecer la zona radicular sin que se produzcan pérdidas excesivas por filtración profunda, excepto cuando hay que lavar el exceso de sales o productos químicos perjudiciales que en ocasiones se acumulan en el suelo.

El conocimiento de la magnitud de la cantidad de agua consumida durante el periodo vegetativo del cultivo ofrece una alternativa para determinar cuándo regar, sin necesidad de llevar a cabo una medición directa del contenido de humedad del suelo. Para tal fin se considera ésta como un equilibrio entre lo que penetra como resultado de la precipitación y el riego y lo que sale en forma de evapotranspiración. La precipitación se mide fácilmente por medio de pluviómetros o pluviógrafos.

### **Fases del periodo de desarrollo de los cultivos**

Normalmente se considera que el periodo de desarrollo de los cultivos está constituido por cuatro fases:

**Fase inicial:** Es el intervalo de tiempo durante el cual se produce la germinación y surgencia del cultivo, durante el cual el suelo aún no está cubierto o apenas lo está.

**Fase de desarrollo del cultivo:** Comprende desde el fin de la fase inicial hasta que se tiene una cubierta totalmente sombreada.

**Fase de mediados del periodo:** Abarca desde el final de la fase de desarrollo hasta el inicio de la maduración. En algunos cultivos, esta fase puede extenderse hasta muy cerca de la recolección.

**Fase final del periodo:** Comprende desde el final de la fase anterior hasta que se llega a la plena maduración o a la recolección.

### **Evaluación de los coeficientes de cultivo**

El procedimiento para obtener los valores de los coeficientes de cultivo ( $k_c$ ) se puede resumir de la manera siguiente: Definir la fecha de plantación o siembra a partir de la información local o de prácticas que se sigan en zonas climáticas semejantes. A partir de información local o de información de localidades con clima semejante, determinar el periodo vegetativo total y los intervalos de tiempo correspondientes a cada fase. Se presentan en la tabla A.2 del Anexo para diferentes cultivos.

### **7.2.3 Aspectos relacionados con el suelo**

Otro factor preponderante en el desarrollo de los cultivos y en la determinación de la aportación de agua en forma de riego lo constituye el suelo. El conocimiento de su capacidad de almacenamiento y del agua disponible para el cultivo es fundamental en el balance hídrico y la calendarización del riego. Para tal efecto, es necesario definir lo siguiente:

#### **Niveles de humedad del suelo**

La humedad del suelo se define como el volumen de agua que llena los intersticios del suelo. Por otro lado, los cultivos tienen una capacidad limitada de extraer el agua del suelo, la cual depende directamente de la profundidad de sus raíces en él, por tal motivo es recomendable agregar solamente el agua necesaria al suelo, de forma que los niveles de humedad permitan a las raíces de los cultivos tomar el oxígeno requerido y evitar así que los contenidos de humedad bajen a niveles en que los cultivos sufran falta de agua.

### **Nivel de saturación**

Por efecto de la lluvia o de la aplicación de un riego en un punto determinado del suelo, el agua va llenando todos los poros del suelo sin dejar espacio alguno al aire y va descendiendo por gravedad a lo largo del perfil del suelo. En tanto que la velocidad de descenso del agua en el suelo permite absorber toda el agua aplicada, ésta va humedeciendo todas las capas del suelo hasta llegar a la capa freática. Pero puede ocurrir que esta velocidad no sea suficiente para absorber toda el agua aportada, o bien, llegue un momento en que se llenen todos los espacios disponibles. Cuando se alcanza este nivel, cualquier cantidad de agua adicional escurrirá por la superficie o producirá encharcamientos. En este momento se presenta el nivel de saturación del suelo. Posteriormente, en función de la permeabilidad del suelo y de la capacidad de drenaje, el agua en exceso que llena los macroporos será eliminada por gravedad hasta llegar a la capa freática.

### **Capacidad de campo (CC)**

Cuando se ha eliminado toda el agua en exceso, por gravedad, se dice que un suelo ha llegado a su capacidad de campo. En esta situación, puede considerarse que el agua ocupa los microporos, y el aire ha ocupado, por difusión, los macroporos. El suelo, en este caso, presenta la máxima capacidad de humedad disponible, la cual depende de su estructura y textura. En esta situación, el agua es retenida en el suelo con muy poca fuerza, pudiendo ser extraída por las plantas con facilidad. Se suele expresar en porcentaje (%) de masa o volumen resaltando que es sumamente importante considerar las unidades en las cuales está medido este parámetro, ya que en el caso de que se exprese en porcentaje (%) de volumen o en masa, el cálculo de la capacidad de almacenamiento y de la dosis de riego neta deberá, o no, emplearse la densidad aparente.

### **Densidad aparente**

La densidad aparente de un suelo corresponde a la densidad de una muestra de suelo a la que se le quita toda el agua. Se suele expresar en  $\text{gr}/\text{cm}^3$ .

## **7.3 Diseño de las tuberías**

Una vez determinadas las características del terreno, de la fuente de abastecimiento y de los gastos máximos que se van a requerir, se diseñan la o las tuberías primarias (de conducción de la fuente al lugar) y secundarias que cubran el terreno, ver el diagrama de la Fig 2.1, y se estima con las fórmula de Darcy-Weisbach, el diagrama de Moody y las fórmulas y diagramas respectivos de pérdidas menores, ver Daily Harleman (1966) o Idelchik (1994), la carga disponible en el inicio de las tuberías laterales en operación, regulando la carga y cerrando, por medio de válvulas, las que no se vayan a utilizar en esa vez.

Se recomienda usar como laterales tubería de 50 m de longitud y de 1.905 cm (3/4 ") de diámetro, con emisores a cada metro. Conviene terminar cada lateral con un codo de 90 grados conectado a un tubo de 1 m de longitud colocado perpendicular al terreno para facilitar la expulsión de aire de la tubería.

La longitud y diámetro de los emisores para las cargas disponibles –no mayores de 2 m- se encuentran utilizando las gráficas de las Figuras 6.5 a 6.9

Para condiciones de riego más variadas utilice las gráficas de diseño de las Figuras 6.10 a la 6.57 donde están las pérdidas acumuladas en el sistema lateral-emisor para una gran cantidad de diferentes condiciones de diámetros, longitudes y cargas.

**PRECAUCIÓN:** Cuidese que la boca de los emisores queden lo más posible en un plano horizontal, para tener gastos por emisor parecidos.

**NOTA.** Para plantas con una separación entre ellas menor a 1 m, se pueden recorrer las laterales, si al principio de ellas se les conecta un tramo de tubería flexible, o se pueden reposicionar los emisores.

## 7.4 Ejemplo numérico

Para ilustrar la forma de utilizar las gráficas anteriores, así como para comparar la diferencia que existe al aumentar el diámetro de la lateral y la longitud de los emisores se presenta un ejemplo.

Primero, se calculan las pérdidas en la lateral, utilizando la ecuación (3.1), para el caso de una tubería de 50 m de longitud, diámetro de 1/2" y gasto por emisor de 8 L/h. Después se estiman las pérdidas en el emisor con las ecuaciones (5.1) y (5.2), si el diámetro del emisor es de 4.76 mm y longitud de 0.1 m.

En la Tabla 7.1 se presenta el cálculo de la pérdida total en el sistema, tomando en cuenta la pérdida en la lateral y el emisor. En la Figura 7.1 se muestra la pérdida de carga en la lateral y el emisor para el caso calculado.

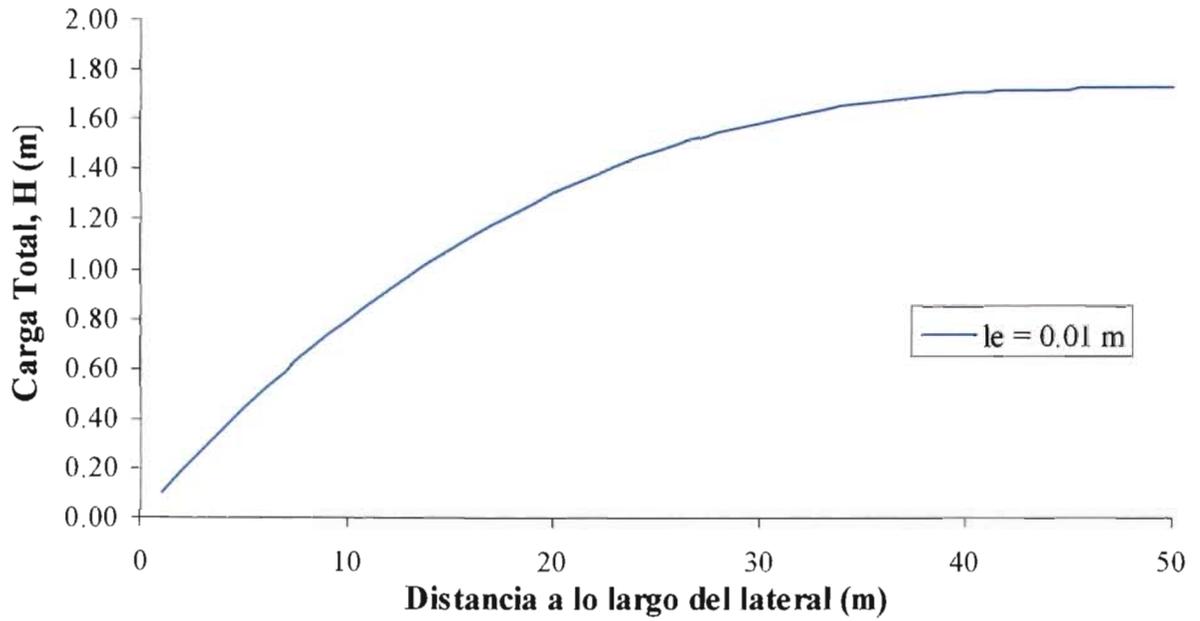


Figura 7.1. Pérdida de carga en la lateral y emisor, de los datos de la Tabla 7.1

L (m)	Q <sub>i</sub> (l/h)	Re <sub>lat</sub>	f <sub>lateral</sub>	V <sup>2</sup> /2g <sub>lat.</sub> (m)	Σhf <sub>lat.</sub> (m)	ΣΔH <sub>lat.</sub> (m)	ΣΔHV <sub>lat.</sub> (m)	ΣΔC <sub>lat.</sub>	ΔH <sub>lateral</sub> (m)	q <sub>i</sub> (l/h)	v <sup>2</sup> /2g <sub>emisor</sub> (m)	Re <sub>i</sub>	l <sub>emisor</sub> (m)	l <sub>i</sub> (m)	α	f <sub>emisor</sub>	k <sub>emisor</sub>	Δk <sub>emisor</sub> (m)	Δhf <sub>emisor</sub> (m)	Δα <sub>emisor</sub>	ΔH <sub>emisor</sub> (m)	H <sub>Total</sub> (m)
1	400	11139.5	0.032	0.0393	0.09778	-0.0031	-0.00155	0.0003	0.0934	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	0.100
2	392	10916.7	0.032	0.0377	0.19215	-0.0062	-0.00308	0.0006	0.1835	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	0.190
3	384	10693.9	0.032	0.0362	0.28319	-0.0091	-0.00457	0.0009	0.2704	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	0.277
4	376	10471.1	0.032	0.0347	0.37093	-0.0121	-0.00603	0.0012	0.3541	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	0.361
5	368	10248.3	0.032	0.0332	0.45543	-0.0149	-0.00746	0.0015	0.4346	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	0.441
6	360	10025.5	0.032	0.0318	0.53874	-0.0177	-0.00886	0.0018	0.5120	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	0.518
7	352	9802.7	0.033	0.0304	0.61492	-0.0204	-0.01022	0.0021	0.5863	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	0.593
8	344	9579.9	0.033	0.0290	0.69001	-0.0231	-0.01156	0.0023	0.6577	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	0.664
9	336	9357.1	0.033	0.0277	0.76207	-0.0257	-0.01286	0.0026	0.7261	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	0.733
10	328	9134.4	0.033	0.0264	0.83116	-0.0283	-0.01413	0.0029	0.7916	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	0.798
11	320	8911.6	0.033	0.0251	0.89733	-0.0307	-0.01537	0.0031	0.8543	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	0.861
12	312	8688.8	0.034	0.0239	0.96063	-0.0332	-0.01658	0.0034	0.9142	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	0.921
13	304	8466.0	0.034	0.0227	1.02111	-0.0355	-0.01776	0.0036	0.9714	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	0.978
14	296	8243.2	0.034	0.0215	1.07884	-0.0378	-0.01890	0.0038	1.0260	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.032
15	288	8020.4	0.034	0.0203	1.13386	-0.0400	-0.02002	0.0041	1.0779	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.084
16	280	7797.6	0.035	0.0192	1.18624	-0.0422	-0.02110	0.0043	1.1272	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.134
17	272	7574.8	0.035	0.0182	1.23603	-0.0443	-0.02215	0.0045	1.1741	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.180
18	264	7352.0	0.035	0.0171	1.28328	-0.0463	-0.02317	0.0047	1.2184	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.225
19	256	7129.3	0.035	0.0161	1.32806	-0.0483	-0.02416	0.0049	1.2605	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.267
20	248	6906.5	0.036	0.0151	1.37041	-0.0502	-0.02512	0.0051	1.3001	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.307
21	240	6683.7	0.036	0.0141	1.41041	-0.0521	-0.02605	0.0053	1.3375	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.344
22	232	6460.9	0.036	0.0132	1.44810	-0.0539	-0.02694	0.0055	1.3727	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.379
23	224	6238.1	0.037	0.0123	1.48354	-0.0556	-0.02781	0.0056	1.4058	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.412
24	216	6015.3	0.037	0.0114	1.51680	-0.0573	-0.02864	0.0058	1.4367	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.443
25	208	5792.5	0.037	0.0106	1.54794	-0.0589	-0.02944	0.0060	1.4656	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.472
26	200	5569.7	0.038	0.0098	1.57700	-0.0604	-0.03021	0.0061	1.4925	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.499
27	192	5346.9	0.038	0.0090	1.60407	-0.0619	-0.03095	0.0063	1.5175	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.524
28	184	5124.1	0.038	0.0083	1.62919	-0.0633	-0.03165	0.0064	1.5407	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.547
29	176	4901.4	0.039	0.0076	1.65243	-0.0647	-0.03233	0.0066	1.5620	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.568
30	168	4678.6	0.039	0.0069	1.67386	-0.0659	-0.03297	0.0067	1.5816	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.588
31	160	4455.8	0.040	0.0063	1.69353	-0.0672	-0.03358	0.0068	1.5996	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.606
32	152	4233.0	0.040	0.0057	1.71151	-0.0683	-0.03417	0.0069	1.6159	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.622
33	144	4010.2	0.041	0.0051	1.72787	-0.0694	-0.03471	0.0070	1.6308	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.637
34	136	3787.4	0.041	0.0045	1.74267	-0.0705	-0.03523	0.0072	1.6441	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.651
35	128	3564.6	0.042	0.0040	1.75598	-0.0714	-0.03572	0.0073	1.6561	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.663
36	120	3341.8	0.043	0.0035	1.76787	-0.0723	-0.03617	0.0073	1.6667	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.673
37	112	3119.0	0.043	0.0031	1.77841	-0.0732	-0.03660	0.0074	1.6761	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.682
38	104	2896.3	0.044	0.0027	1.78767	-0.0740	-0.03699	0.0075	1.6842	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.691
39	96	2673.5	0.045	0.0023	1.79571	-0.0747	-0.03735	0.0076	1.6913	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.698
40	88	2450.7	0.046	0.0019	1.80262	-0.0754	-0.03768	0.0077	1.6972	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.704
41	80	2227.9	0.047	0.0016	1.80847	-0.0760	-0.03798	0.0077	1.7023	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.709
42	72	2005.1	0.049	0.0013	1.81334	-0.0765	-0.03825	0.0078	1.7064	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.713
43	64	1782.3	0.036	0.0010	1.81618	-0.0770	-0.03848	0.0078	1.7086	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.715
44	56	1559.5	0.041	0.0008	1.81866	-0.0774	-0.03869	0.0079	1.7105	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.717
45	48	1336.7	0.048	0.0006	1.82079	-0.0777	-0.03886	0.0079	1.7121	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.719
46	40	1113.9	0.057	0.0004	1.82257	-0.0780	-0.03900	0.0079	1.7135	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.720
47	32	891.2	0.072	0.0003	1.82399	-0.0782	-0.03911	0.0080	1.7146	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.721
48	24	668.4	0.096	0.0001	1.82506	-0.0784	-0.03919	0.0080	1.7155	8	0.000796	594.42	0.184	0.10	1.54	0.0658	5.174	0.004117	0.00110	0.001228	0.00645	1.722
49	16																					



## 8. CONCLUSIONES

- Es necesario desarrollar y dar a conocer sistemas de riego de alta eficiencia que permitan ahorros significativos de agua y que sean útiles para el sector agrícola; además, que tengan como características principales ser confiables en su operación y eficientes desde el punto de vista energético.
- Se encontró experimentalmente un coeficiente de pérdida  $k_e$  para diferentes longitudes y diámetros del emisor entre un número de Reynolds entre 30 y 1000.
- Los resultados obtenidos en este trabajo permitan ver el comportamiento hidráulico de los emisores y las líneas laterales en un sistema de riego de 2 a 8 L/h y de una carga de 1 a 2 m.
- Para el cálculo del coeficiente de pérdidas distribuidas “f” se utiliza la fórmula de Blasius modificada. Se encontró que la modificación que más se aproxima a los datos experimentales es con un coeficiente, en el numerador de la fórmula, de 0.316 a 0.325 para números de Reynolds mayores a 2000.
- Como los diámetros de los emisores son pequeños, en las mediciones realizadas se vió que no influye la tensión superficial, ya que se experimentó con dos fluidos distintos: agua y petróleo y se obtuvieron los mismos resultados, por lo que este efecto no se tomó en cuenta en el flujo de los emisores..
- En la hidráulica de la tubería lateral hay que tomar en cuenta el cambio de momentum en la ecuación de energía de una sección a la siguiente, por ser un flujo espacialmente variado.
- En la hidráulica de los emisores se encontró que existe una diferencia en el coeficiente de pérdida por entrada  $k_e$  cuando el flujo laminar está totalmente desarrollado o no. Se encontraron experimentalmente los coeficientes de pérdidas para diferentes números de Reynolds, tanto para  $l_i > l_e$  como para  $l_i < l_e$ , como se ve en las gráficas (5.3) y (5.4) y en las ecuaciones (5.3) y (5.4).
- Al realizar una comparación del sistema aquí presentado con los métodos de Yaohu (1996) y Juana (2002) se tienen diferencias considerables, como se puede observar en las figuras (5.7) y (5.8). Sin embargo se estima que se puede utilizar el sistema propuesto en este trabajo ya que cumple que es de baja carga y esta respaldado por innumerables experimentos.
- De la experimentación en los emisores o goteros se encontró la relación que hay entre carga al inicio del emisor y gasto por él. Con estas cargas se puede diseñar un emisor inteligente, que para presiones pequeñas la abertura del gotero sea grande y para presiones grandes la abertura sea pequeña, lo cual quiere decir que

el gotero siempre tendrá un mismo gasto, como se puede ver en las figuras (6.3) y (6.4) y el diseño propuesto de un emisor de este tipo en la figura (6.58).

- De las gráficas de diseño para la tubería lateral con emisores se observa que para varios casos no cumple la característica principal del RPBC que es, el ser un sistema de baja carga; por lo tanto, como una recomendación para que cumpla con su característica principal se recomienda utilizar en la tubería lateral un diámetro de 1 a 2" y utilizar un diámetro del emisor de 2.22 a 4.76 mm. En cuanto a la longitud del emisor puede variar de 0.01 a 1.00 m.
- El análisis de sensibilidad de temperatura conservador realizado para un aumento de temperatura de 5° C al agua, no afecta el flujo en la tubería lateral. En los emisores al incrementar la temperatura habría cambios en los gastos hasta en un 9% en los emisores cortos y un 4% en los emisores largos.
- Con base en los resultados obtenidos, no se ve ningún inconveniente serio para el funcionamiento confiable del sistema. El dispositivo de control de carga constante es sencillo de construir y de operar, y mantiene dicha carga para las variaciones de gasto que se podrían esperar en condiciones reales.
- De manera cualitativa se ve favorable económicamente el sistema de RPBC, dado que no requiere elaborados sistemas de filtrado y, además, con el desarrollo de nuevos materiales cada vez más económicos y duraderos, aumenta la posibilidad de amortizar los costos en pocos años.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Bagarello, V., Ferro, V., Provenzano, G. y Pumo, D. (1997). **Evaluating Pressure Losses in Drip-Irrigation Lines**, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE. Vol. 123, No. 1, January/February, pp. 1-7.
2. Bagarello, V., Ferro, V., Provenzano, G. y Pumo, D. (1997). **Experimental Study on Flow-Resistance Law for Small-Diameter Plastic Pipes**, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE. Vol. 121, No. 5, September/October, pp. 313-316.
3. Benami A. y Ofen A. (1984). **Irrigation Engineering**, Technician Israel Institute of Technology, Haifa, Israel.
4. Bernuth Von, R.D y Tonya Wilson. (1989). **Friction Factors for Small Diameter Plastic Pipes**, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. Vol. 115, No. 2, February, pp. 183-192.
5. Bernuth Von, R.D. (1990). **Simple and Accurate Friction Loss Equation for Plastic Pipe**, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE. Vol. 116, No. 2, March/April, pp. 294-298.
6. Burt, C.M., A.J. Clemmens. (1999). **Selection of Irrigation Methods for Agriculture**, Environmental and Water Resources Institute, ASCE, USA. pp. 61-120.
7. Charles A. Harper. (1992). **Handbook of plastics, elastomers and composites**, second edition, Ed. McGraw Hill, New York, USA. pp. 197-198.
8. Chen, J.J.J. (1985). **A simple explicit formula for the estimation of pipe friction factor**, Discussion on technical Note 400. Proceedings Instn. Civil Engineering, Part 2, Vol. 79, March, pp. 215-221.
9. Daily, J.W. y Harleman, Donald R.F. (1966). **Fluid Dynamics**, Addison-Wesley, Massachusetts, USA. pp. 259-281.
10. Echávez, A.G., Moreno, A.V., Reyes, D.E., Ortiz, N.L.A. (1997). **Tres informes. Riego Presurizado de Baja Carga**, Fideicomiso de Riesgo Compartido, UNAM, UAC, Distrito Federal, México.
11. Echávez, A.G. (1996). **Introducción a los modelos hidráulicos de fondo fijo y a la ingeniería experimental**, UNAM-CONACYT-AMH, Distrito Federal, México.
12. Echávez, A.G. y Ortiz, N.L.A. (2001). **Pérdidas distribuidas y de entrada en tubos para números de Reynolds moderados**, Ingeniería Hidráulica en México, Vol. XVI, núm. 1, II Época, enero-marzo. pp. 27-33.
13. Echávez, A.G. y Ruiz, S.G. (2003). **Pérdidas de carga en conductos circulares de diámetro pequeño para números de Reynolds entre 33 y 900**, Ingeniería Hidráulica en México, Vol. XVIII, núm. 1, II Época, enero-marzo. pp. 119-125.
14. Echávez, A.G. y Ruiz, S.G. (2003). **Riego presurizado de baja carga para el desarrollo rural**, Congreso Internacional de Riego y Drenaje, La Habana, Cuba. pp. 1-13.
15. FAO. (1977). **Crop Water Requirements**, Irrigation and Drainage, Paper 24, Roma, Italia.
16. FAO. (1991). **Expert Consultation on Revision of FAO Methodologies for Crop Water Requirements**, Land and Water Development Division, Roma, Italia.

17. Ferro, Vito. (1999). **Applying Hypothesis of Self-Similarity for Flow-Resistance Law of Small-Diameter Plastic Pipes**, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE. Vol. 123, No. 3, May/June, pp. 175-179.
18. Gleick, Peter H. (2000). **The World's Water 2000-2001. The Biennial Report on Freshwater Resources**, Island Press, Washington, USA. pp. 63-92.
19. Henry L. Langhaar. (1942). **Steady Flow in the Transition Length of a Straight Tube**, Journal Applied Mechanics, ASME. Vol. 9, June, pp. A55-A58.
20. Idelchik, I.E. (1994). **Handbook of hydraulics resistance**, 3<sup>rd</sup> edición, CRC Press, New York, USA. pp. 78-81.
21. Ingco, M.D., Mitchell, D.O. y McCalla, A.F. (1996). **Global Food Supply Prospects**, World Bank Technical Paper No. 353. World Bank, Washington, D.C., USA.
22. Juana, Luis; Rodríguez, S.L. y Losada, Alberto. (2002). **Determining Minor Head Losses in Drip Irrigation Laterals. I: Methodology**, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. Vol. 128, No. 6, December, pp. 376-384.
23. Juana, Luis; Rodríguez, S.L. y Losada, Alberto. (2002). **Determining Minor Head Losses in Drip Irrigation Laterals. I: Experimental Study and Validation**, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. Vol. 128, No. 6, December, pp. 385-396.
24. López J. Rodrigo, Hernández, J.M., Pérez, R.A. y González, J.F. (1992). **Riego localizado**, Centro Nacional de Tecnología de Regadíos (CENTER), Editorial Mundi-Prensa. Madrid, España.
25. National Research Council (NRC). (1996). **A New Era for Irrigation**, National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C.
26. Panton, R.L. (1997). **Incompressible flow**, John Wiley & Sons, New York, USA. pp. 359-400.
27. Pimental, D, J. Houser, E. Preiss, O. White, H. Fang, L. Mesnick, T. Barsky, S. Tariche, J. Schreck y S. Albert. (1997). **Water Resources: Agriculture, the environment, and society**, Bioscience, Vol. 47, No. 2, pp. 97-106.
28. Postel, S.L. (1998). **Water for food production: Will there be enough in 2025?**, Bioscience, Vol. 48, No. 8, pp. 629-637.
29. Prandtl, L. y Tietjens, O.G. (1957). **Applied hydro and aeromechanics**, Dover, New York, USA. pp. 24-29.
30. Rouse, H. (1962). **Elementary Mechanics of Fluids**, John Wiley & Sons, New York, USA. pp. 189, 211, 313-314.
31. Rouse, H. (1963). **Advanced Mechanics of Fluids**, John Wiley & Sons, New York, USA. pp. 1-14, 56-66, 200-260.
32. Schlichting, H. (1979). **Boundary Layer Theory**, 7<sup>th</sup> ed. McGraw Hill, New York, USA. pp. 68-75.
33. Shiklomanov, I.A. (1998). **Assessment of water resources and water availability in the world**, Report for the Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World, United Nations, State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia.
34. Shneider, Arland D. y Howell, Terry A. (1999). **LEPA and Spray Irrigation for Grain Crops**, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE. Vol. 125, No. 4, July/August, pp. 167-171.
35. Solomon, K. H. (1985). **Global Uniformity of Trickle Irrigation System**, ASAE Transaction, Vol. 28, No. 4, pp. 1151-1158.

36. Tritton, D.J. (1995). **Physical Fluid Dynamics**, Oxford Science, Oxford, United Kingdom. pp. 98.
37. United Nations 1998. (1998). **1998 Revision of the World Population Estimates and Projections**, Popular Division, Department of Economic and Social Affairs.
38. United Nations Food and Agriculture Organization (UNFAO). (1995). **World agriculture: Toward 2010, an FAO study**, Chichester, United Kingdom, and the United Nations Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
39. United Nations Food and Agriculture Organization (UNFAO). (1996). **Food, agriculture, and food security: Developments since the World Food Conference and prospects**, World Food Summit Technical Background Document 1. FAO, Rome, Italy.
40. Yaohu Kang y Soichi Nishiyama. (1996). **Analysis Design of Microirrigation Laterals**, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE. Vol. 122, No. 2, March/April, pp. 75-82.
41. Yaohu Kang y Soichi Nishiyama. (1996). **Design of Microirrigation Submain Units**, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE. Vol. 122, No. 2, March/April, pp. 83-88.



# ANEXO A

## A.1 Profundidad Radicular (Pr)

Tabla A.1 Rango de máxima profundidad radicular y descenso tolerable de humedad, para diferentes cultivos.

Cultivo	Profundidad Maxima Radicular (m)	Descenso de humedad (para ET » 5 mm/día) p
<b>a. Pequeños Vegetales</b>		
Brócoli	0.4-0.6	0.45
Col de Bruselas	0.4-0.6	0.45
Col	0.5-0.8	0.45
Zanahoria	0.5-1.0	0.35
Coliflor	0.4-0.7	0.45
Apio	0.3-0.5	0.20
Ajo	0.3-0.5	0.30
Lechuga	0.3-0.5	0.30
Cebolla		
- seca	0.3-0.6	0.30
- verde	0.3-0.6	0.30
- semilla	0.3-0.6	0.35
Espinaca	0.3-0.5	0.20
Rábano	0.3-0.5	0.30
<b>b Vegetales – Familia de las Solanáceas</b>		
Berenjena	0.7-1.2	0.45
Pimiento Dulce	0.5-1.0	0.30
Tomate	0.7-1.5	0.40
<b>c. Vegetales – Familia de las cucurbitáceas</b>		
Melón	0.9-1.5	0.45
Pepino	0.7-1.2	0.50
Calabaza	1.0-1.5	0.35
Calabaza tierna	0.6-1.0	0.50
Melón dulce	0.8-1.5	0.40
Melón de agua	0.8-1.5	0.40
<b>d. Raíces y Tubérculos</b>		
Betabel	0.6-1.0	0.50
Yuca		
- Primer año	0.5-0.8	0.35
- Segundo año	0.7-1.0	0.40
Rábano blanco	0.5-1.0	0.40
Papas	0.4-0.6	0.35

Comportamiento hidráulico de un sistema de riego por goteo

Camote	1.0-1.5	0.65
Nabo	0.5-1.0	0.50
Remolacha	0.7-1.2	0.55
<b>e. Legumbres</b>		
Ejotes	0.5-0.7	0.45
Fríjol	0.6-0.9	0.45
Haba	0.8-1.2	0.45
Garbanzo	0.6-1.0	0.50
Alubia		
- Frasco	0.5-0.7	0.45
- Seco	0.5-0.7	0.45
Especie de Garbanzo	0.6-1.0	0.45
Cacahuete	0.5-1.0	0.50
Lenteja	0.6-0.8	0.50
Chicharo		
- Fresco	0.6-1.0	0.35
- Seco	0.6-1.0	0.40
Fríjol de soya	0.6-1.3	0.50
<b>f. Vegetales perennes</b>		
Alcachofa	0.6-0.9	0.45
Espárrago	1.2-1.8	0.45
Menta	0.4-0.8	0.40
Fresas	0.2-0.3	0.20
<b>g. Cultivos de fibra</b>		
Algodón	1.0-1.7	0.65
Lino	1.0-1.5	0.50
Henequén	0.5-1.0	0.80
<b>h. Cultivos de aceite</b>		
Resino	1.0-2.0	0.50
Colza	1.0-1.5	0.60
Cártamo	1.0-2.0	0.60
Ajonjolí	1.0-1.5	0.60
Girasol	0.8-1.5	0.45
<b>i. Cereales</b>		
Cebada	1.0-1.5	0.55
Avena	1.0-1.5	0.55
Trigo de primavera	1.0-1.5	0.55
Trigo de invierno	1.5-1.8	0.55
Maíz en grano	1.0-1.7	0.55
Elote	0.8-1.2	0.50

Anexo A

Mijo	1.0-2.0	0.55
Sorgo		
- grano	1.0-2.0	0.55
- dulce	1.0-2.0	0.50
Arroz	0.5-1.0	0.20
<b>j. Forrajes</b>		
Alfalfa		
- para paja	1.0-2.0	0.55
- para semilla	1.0-3.0	0.60
Gramma		
- para paja	1.0-1.5	0.55
- Semilla para cosecha en primavera	1.0-1.5	0.60
Trébol para paja	0.6-0.9	0.50
Centeno	0.6-1.0	0.60
Pastura		
- Pastura de ciclo	0.5-1.5	0.60
- Pastura extendida	0.5-1.5	0.60
Césped		
Temporada fresca	0.5-1.0	0.40
Temporada cálida	0.5-1.0	0.50
<b>k. Caña de azúcar</b>	1.2-2.0	0.65
<b>l. Frutas Tropicales y Árboles</b>		
Plátano		
Primer año	0.5-0.9	0.35
Segundo año	0.5-0.9	0.35
Cacao	0.7-1.0	0.30
Café	0.9-1.5	0.40
Dátil	1.5-2.5	0.50
Palmera	0.7-1.1	0.65
Piña	0.3-0.6	0.50
Caucho	1.0-1.5	0.40
Té		
Sin sombra	0.9-1.5	0.40
Sombreado	0.9-1.5	0.45
<b>m. Uvas y Moras</b>		
Arbustos de moras	0.6-1.2	0.50
Uvas		
Fruta	1.0-2.0	0.35
Vino	1.0-2.0	0.45

## Comportamiento hidráulico de un sistema de riego por goteo

Lúpulo	1.0-1.2	0.50
<b>n. Árboles frutales</b>		
Almendra	1.0-2.0	0.40
Manzana, cereza, pera	1.0-2.0	0.50
Chabacano, durazno, fruta de hueso	1.0-2.0	0.50
Aguacate	0.5-1.0	0.70
<b>Cítricos</b>		
- 70% cubierto	1.2-1.5	0.50
- 50% cubierto	1.1-1.5	0.50
- 20% cubierto	0.8-1.1	0.50
Árbol de coníferas	1.0-1.5	0.70
Kiwi	0.7-1.3	0.35
Olivo	1.2-1.7	0.65
Pistache	1.0-1.5	0.40
Nogal	1.7-2.4	0.50

## A.2 Duración de la fase de crecimiento

Tabla A.1 Duración de etapas de planeación de la cosecha para los varios periodos de plantación y regiones climáticas en días.

Cultivo	Inicio (días)	Desarrollo (días)	Cobertura (días)	Maduración (días)	Total (días)	Fecha de Plantación	Región
<b>a. Pequeños Vegetales</b>							
Brócoli	35	45	40	15	135	Septiembre	Desierto
Col	40	60	50	15	165	Septiembre	Desierto
Zanahoria	20	30	50/30	20	100	Oct.-Enero	Clima Árido
	30	40	60	20	150	Feb.-Mar.	Mediterráneo
	30	50	90	30	200	Oct	Desierto
Coliflor	35	50	40	15	140	Septiembre	Desierto
Apio	25	40	95	20	180	Oct	Semiárido
	25	40	45	15	125	Abril	Mediterráneo
	30	55	105	20	210	Enero	Semiárido
Crucíferas	20	30	20	10	80	Abril	Mediterráneo
	25	35	25	10	95	Febrero	Mediterráneo
	30	35	90	40	195	Oct.-Nov	Mediterráneo
Lechuga	20	30	15	10	75	Abril	Mediterráneo
	30	40	25	10	105	Nov.-Enero	Mediterráneo
	25	35	30	10	100	Oct.-Nov	Árido Región
	35	50	45	10	140	Febrero	Mediterráneo
Cebolla (árida)	15	25	70	40	150	Abril	Mediterráneo
	20	35	110	45	210	Oct.-Enero.	Región árida
Cebolla (verde)	25	30	10	5	70	Abril - Mayo	Mediterráneo
	20	45	20	10	95	Octubre	Región Árida
	30	55	55	40	180	Marzo	Desierto
Cebolla	20	45	165	45	275	Septiembre	Desierto
Espinaca	20	20	15/25	5	60/70	Abr; Sep-Oct	Mediterráneo
	20	30	40	10	100	Noviembre	Región Árida
Rábano	5	10	15	5	35	Marzo-Abril	Mediterráneo, Europa
	10	10	15	5	40	Invierno	Región Árida
<b>b. Vegetales – Familia de las Solanáceas</b>							
Berenjena	30	40	40	20	130\1	Octubre	Región árida
	30	45	40	25	40	Mayo - Junio	Mediterráneo
Pimiento	25/30	35	40	20	125	Abril - Junio	Mediterráneo, Europa

Comportamiento hidráulico de un sistema de riego por goteo

Dulce	30	40	110	30	210	Octubre	Región árida
Tomate	30	40	40	25	135	Enero	Región árida
	35	40	50	30	155	Abril - Mayo	California, USA.
	25	40	60	30	155	Enero	Desierto
	35	45	70	30	180	Oct - Nov	Región árida
	30	40	45	30	145	Abril - Mayo	Mediterráneo
<b>c. Vegetales – Familia de las cucurbitáceas</b>							
Melón	30	45	35	10	120	Enero	California, USA.
	10	60	25	25	120	Agosto	California, USA.
Pepino	20	30	40	15	105	Junio-agosto	Región árida
	25	35	50	20	130	Nov; Feb	Región árida
Calabaza de cuello curvo	20	30	30	20	100	Mar, Agosto	Mediterráneo
	25	35	35	25	120	Junio	Europa
Calabaza	25	35	25	15	100	Abr; Dic.	Mediterráneo, Árido
	20	30	25	15	90	Mayo / junio	Mediterráneo, Europa
Melón dulce	25	35	40	20	120	Mayo	Mediterráneo
	30	30	50	30	140	Marzo	California, USA.
	15	40	65	15	135	Agosto	Desierto
	30	45	65	20	160	Dic.-Enero	Región árida
Melón de agua	20	30	30	30	110	Abril	Italia
	10	20	20	30	80	Mayo-Agosto	Este (Desierto)
<b>d. Raíces</b>							
Betabel	15	25	20	10	70	Abril-Mayo	Mediterráneo
	25	30	25	10	90	Feb.-Marzo	Mediterráneo y árido
Papa	25	30	30/45	30	115/130	Enero-Nov	Clima Semiárido
	25	30	45	30	130	Mayo	Clima Continental
	30	35	50	30	145	Abril	Europa
	45	30	70	20	165	Abril-Mayo	Idaho, USA
	30	35	50	25	140	Dic	Desierto
Papa dulce	20	30	60	40	150	Abril	Mediterráneo
	15	30	50	30	125	En lluvias	Regiones tropicales
Remolacha	30	45	90	15	180	Marzo	California, USA.
	25	30	90	10	155	Junio	California, USA.
	25	65	100	65	255	Septiembre	Desierto
	50	40	50	40	180	Abril	Idaho, USA
	25	35	50	50	160	Mayo	Mediterráneo
	45	75	80	30	230	Noviembre	Mediterráneo
	35	60	70	40	205	Noviembre	Regiones aridas

Anexo A

<b>e. Legumbres</b>							
Frijol (verde)	20	30	30	10	90	Feb-Marzo	Mediterráneo, Calif.
	15	25	25	10	75	Agosto-Sep	California, Egipto, Líbano
Frijol (seco)	20	30	40	20	110	Mayo-Junio	Clima Continental
	15	25	35	20	95	Junio	Pakistán, California
	25	25	30	20	100	Junio	Idaho, USA
Haba	15	25	35	15	90	Mayo	Europa
	20	30	35	15	100	Marzo-Abr.	Mediterráneo
- seca	90	45	40	60	235	Nov	Europa
- verde	90	45	40	0	175	Nov	Europa
Garbanzo	20	30	30	20	110	Marzo	Mediterráneo
Lenteja	20	30	60	40	150	Abril	Europa
	25	35	70	40	170	Oct.-Nov.	Región árida
Vaina de guisantes	15	25	35	15	90	Mayo	Europa
	20	30	35	15	100	Marzo-Abril	Mediterráneo
	35	25	30	20	110	Abril	Idaho, USA
Soya	15	15	40	15	85	Dic	Trópico
	20	30/35	60	25	140	Mayo	Centro de USA
	20	25	75	30	150	Junio	Japón
<b>f. Vegetales perennes</b>							
Alcachofa	40	40	250	30	360	Abr (1 <sup>er</sup> año)	California
	20	25	250	30	325	Mayo (2 <sup>nd</sup> año)	Cortar en Mayo
Espárrago	50	30	100	50	230	Feb	Invierno caluroso
	90	30	200	45	365	Feb	Mediterráneo
<b>g. Cultivos de fibra</b>							
Algodón	30	50	60	55	195	Mar-Mayo	Egipto; Pakistán; California, USA.
	45	90	45	45	225	Mar	Desierto
	30	50	60	55	195	Septiembre	Yemen
	30	50	55	45	180	Abril	Texas
Lino	25	35	50	40	150	Abril	Europa
	30	40	100	50	220	Octubre	Arizona
<b>h. Cultivos de aceite</b>							
Resino	25	40	65	50	180	Marzo	Clima semiárido
	20	40	50	25	135	Nov.	Indonesia
Cártamo	20	35	45	25	125	Abril	California, USA
	25	35	55	30	145	Mar	Latitudes Altas
	35	55	60	40	190	Oct.-Nov.	Región árida
Ajonjolí	20	30	40	20	100	Junio	China

Comportamiento hidráulico de un sistema de riego por goteo

Girasol	25	35	45	25	130	Abril-Mayo	Mediterráneo, Calif.
<b>i. Cereales</b>							
Cebada-avena-trigo	15	25	50	30	120	Noviembre	Centro de India
	20	25	60	30	135	Marzo-Abril	35-45 ° de latitud
	15	30	65	40	150	Julio	Este de África
	40	30	40	20	130	Abril	
	40	60	60	40	200	Noviembre	
	20	50	60	30	160	Diciembre	Desierto
Trigo de invierno	20	60	70	30	180	Diciembre	California, USA.
	30	140	40	30	240	Noviembre	Mediterráneo
	160	75	75	25	335	Octubre	Idaho, USA
Granos (pequeños)	20	30	60	40	150	Abril	Mediterráneo
	25	35	65	40	165	Oct.-Nov.	Pakistán, región árida
Maíz (grano)	30	50	60	40	180	Abril	Este de África
	25	40	45	30	140	Dic.-Enero	Clima Árido
	20	35	40	30	125	Junio	Nigeria (húmedo)
	20	35	40	30	125	Octubre	India (seco, frío)
	30	40	50	30	150	Abril	España, California
	30	40	50	50	170	Abril	Idaho, USA
Maíz (dulce)	20	20	30	10	80	Marzo	Filipinas
	20	25	25	10	80	Mayo-Junio	Mediterráneo
	20	30	50/30	10	90	Oct.-Dic.	Clima Árido
	30	30	30	103	110	Abril	Idaho, USA
	20	40	70	10	140	Enero	Desierto
Mijo	15	25	40	25	105	Junio	Pakistán
	20	30	55	35	140	Abril	Central USA
Sorgo	20	35	40	30	130	Mayo-Junio	USA, Pakistán., Mediterráneo.
	20	35	45	30	140	Marzo-Abril	Región árida
Arroz	30	30	60	30	150	Dic; Mayo	Trópico; Mediterráneo
	30	30.	80	40	180	Mayo	Trópico
<b>j. Forrajes</b>							
Alfalfa	10	30	variable	variable	variable		
Alfalfa, 1 <sup>er</sup> corte	10	20	20	10	60	Enero-Abril	California, USA.
	10	30	25	10	75		Idaho, USA.
Alfalfa, otro ciclo de corte.	5	10	10	5	30	Mar	California, USA.
	5	20	10	10	45	Jun	Idaho, USA.
Bermuda semilla	10	25	35	35	105	Marzo	Desierto
Bermuda (heno)	10	15	75	35	135	---	Desierto

Anexo A

Pastura	10	20	--	--	--		
<b>k. Caña de azúcar</b>							
Caña de azúcar virgen	35	60	190	120	405		Latitudes Bajas
	50	70	220	140	480		Trópico
	75	105	330	210	720		Hawai, USA
Retoño de caña de azúcar	25	70	135	50	280		Latitudes Bajas
	30	50	180	60	320		Trópico
	35	105	210	70	420		Hawai, USA
<b>l. Frutas tropicales y árboles</b>							
Banana, 1 <sup>er</sup> año	120	90	120	60	390	Mar	Mediterráneo
Banana, 2 <sup>do</sup> año	120	60	180	5	365	Feb	Mediterráneo
Piña	60	120	600	10	790		Hawai, USA
<b>m. Vid</b>							
Uva	20	40	120	60	240	Abril	Latitudes Bajas
	20	50	75	60	205	Mar	California, USA.
	20	50	90	20	180	Mayo	Latitudes Altas
	30	60	40	80	210	Abril	Latitudes medias
Lúpulo	25	40	80	10	155	Abril	Idaho, USA
<b>n. Árboles frutales</b>							
Cítrico	60	90	120	95	365	Enero	Mediterráneo
Huerto	20	70	90	30	210	Marzo	Latitudes Altas
	20	70	120	60	270	Marzo	Latitudes Bajas
	30	50	130	30	240	Marzo	California, USA.
Olivo	30	90	60	90	2705	Marzo	Mediterráneo
Pistaches	20	60	30	40	150	Feb	Mediterráneo
Nogal	20	10	130	30	190	Abril	Utah, USA

