



Título del Trabajo Fin de Máster:
***DISEÑO ÓPTIMO DE SISTEMAS DE
RIEGO A PRESIÓN Y SU
EFICIENCIA HIDRO-ENERGÉTICA.
APLICACIÓN EN EL CASO DE LOJA
(ECUADOR)***

Intensificación:

HIDRÁULICA URBANA

Autor:

LAPO PAUTA, CARMEN MIREYA

Director/es:

DR. PEREZ GARCIA, RAFAEL

Fecha: ***SEPTIEMBRE/2012***



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma



Título del Trabajo Fin de Máster:
DISEÑO ÓPTIMO DE SISTEMAS DE RIEGO A PRESIÓN Y SU EFICIENCIA HIDRO-ENERGÉTICA. APLICACIÓN EN EL CASO DE LOJA (ECUADOR)

Autor: ***Lapo Pauta, Carmen Mireya***

Tipo	A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/>	Lugar de Realización	LOJA
Director	Pérez García Rafael	Fecha de Lectura	09, 2012
Codirector1			
Codirector2			
Tutor			

Resumen:

La optimización permite encontrar la mejor solución a un problema, en términos de calidad, coste, fiabilidad o cualquier otro criterio de utilidad; varios autores han propuesto métodos para que el diseño de redes presurizadas para abastecimiento o riego cumplan eficientemente las prestaciones de servicio y operación; considerando el factor económico como una variable decisiva en la resolución de este tipo de problemas. En la presente investigación se plantea abordar esta tarea, para lo cual se propone una metodología sistemática, que combina dos técnicas de optimización a través de los “*métodos híbridos*”, en donde se fusionan la programación lineal, programación no lineal y algoritmos genéticos. La formulación global del problema de dimensionado óptimo consistirá en minimizar la función objetivo, configurada por los costes asociados a las tuberías; con el único propósito de emprender la resolución de los problemas de gestión de las redes de riego presurizadas.

La investigación que se plantea incluye los siguientes objetivos:

- ✓ Desarrollar una metodología para la optimización de turnos de riego en redes abiertas presurizadas.
- ✓ Implementar un modelo de control de la red (sistema de adquisición de datos), en donde se realizará el monitoreo de variables decisivas en la gestión de la red, para lo cual se instalará una estación de ensayo de emisores: goteros, microaspersores y aspersores.



- ✓ Evaluar los resultados del diseño óptimo resultante con otros métodos existentes.

Con esta finalidad se ha desarrollado una secuencia, que permita optimizar los turnos de riego en redes ramificadas a presión, a través de obtener la combinación de hidrantes óptima para cada turno que se encuentre asignado en los nudos de la red; que cumpla con el criterio económico - óptimo, y la consiguiente distribución del recurso hídrico en forma homogénea, cumpliendo con la garantía de suministro deseada, funcionando en forma eficiente, y buscando el equilibrio energético según el requerimiento de los nudos demandantes.

Este proceso se ha aplicado a redes de riego existentes en el entorno, que han sido modeladas para verificar el beneficio de utilizarla metodología propuesta en lo que se refiere a prestaciones de servicio: caudal en líneas, presiones en nudos y velocidades del flujo.

The optimization allows to find the best solution to a problem, in terms of quality, cost, reliability or any other criterion of utility, several authors have proposed methods for network design to supply or pressurized irrigation efficiently meet performance and operation Whereas the economic factor as a variable in the resolution of these problems. In the present investigation was intended to address this task, for which we propose a systematic methodology, which combines two optimization techniques through "hybrid methods" where merging linear programming, non linear programming and genetic algorithms. The overall formulation of the problem of optimal sizing consists of minimizing the objective function, set by the costs associated with the pipes for the sole purpose of undertaking the resolution of the problems of management of pressurized irrigation networks.

The research arises includes the following objectives:

- ✓ Develop a methodology for optimizing shifts pressurized irrigation in open networks.
- ✓ Implement a model of network control (data acquisition system), where they



will monitor critical variables in the management of the network, which will install a test station issuers: emitters, micro sprinklers and sprinklers .

- ✓ Evaluate the resulting optimal design results with other existing methods.

For this purpose a sequence has been developed, which allows to optimize the irrigation shifts in pressure branched networks through hydrant obtain the optimum combination for each turn that is assigned to the nodes of the network that meets the criterion economic - optimal, and the resulting distribution of water resources in a homogeneous, fulfilling the desired supply security, operating efficiently, and seeking energy balance according to the requirement of applicants knots.

This process has been applied to existing irrigation networks in the environment, which have been shaped to verify the benefit of using the methodology proposed in regard to service features: flow in lines knots pressures and flow velocities.

L'optimització permet trobar la millor solució a un problema, en termes de qualitat, cost, fiabilitat o qualsevol altre criteri d'utilitat; diversos autors han proposat mètodes perquè el disseny de xarxes pressuritzades per a abastiment o reg complis quen eficientment les prestacions de servici i operació; considerant el factor econòmic com una variable decisiva en la resolució d'este tipus de problemes. En la present investigació es planteja abordar esta tasca, per a la qual cosa es proposa una metodologia sistemàtica, que combina dos tècniques d'optimització a través dels 'métodos híbridos', on es fusionen la programació lineal, programació no lineal i algoritmes genètics. La formulació global del problema de dimensionat òptim consistirà a minimitzar la funció objectiu, configurada pels costos associats a les canonades, amb l'únicpropòsit d'emprendre la resolució dels problemes de gestió de les xarxes de reg pressuritzades.

La investigació que es planteja inclouels següents objectius:

- ✓ Desenrotllar una metodologia per a l'optimització de torns de reg en xarxes obertes pressuritzades.
- ✓ Implementar un model de control de la xarxa (sistema d'adquisició de dades), on es realitzarà el monitoreo de variables decisives en la gestió de la xarxa, per a la qual cosa s'instal·larà una estació d'assaig d'emissors: goters, microaspersores i aspersores.
- ✓ Avaluar els resultants del disseny òptim resultant amb altres mètodes



existents.

Amb esta finalitat s'ha desenrotllat una seqüència, que permeta optimitzar els torns de reg en xarxes ramificades a pressió, a través d'obtindre la combinació de hidrantes òptima per a cada torn que es trobe assignat en els nucs de la xarxa; que complisca amb el criteri econòmic - òptim, i la consegüent distribució del recurs hídric en forma homogènia, complint amb la garantia de subministrament desitjada, funcionant en forma eficient, i buscant l'equilibri energètic segons el requeriment dels nucs demandants

Este procés s'ha aplicat a xarxes de reg existents en l'entorn, que han sigut modelades per a verificar el benefici d'utilitzar la metodologia proposada pel que fa a prestacions de servici: cabal en línies, pressions en nucs i velocitats del flux.

Palabras clave:

Optimización, métodos híbridos, turnos de riego, equilibrio energético, criterio económico - óptimo

AGRADECIMIENTO:

Al culminar este trabajo emprendido y reconociendo el bien recibido deseo agradecer a Dios amigo fiel y fortaleza en todo instante. A mi esposo, quien con su apoyo incondicional forjó la consecución de esta meta, a mi hija Daniela Nahomi por su amor y su comprensión, a toda mi familia que siempre me alentó.....

A todos los docentes del Master de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente por los conocimientos y asesoría oportuna, en especial a mi tutor el Dr. Rafael Pérez quien con su guía acertada, sus enseñanzas y amistad sincera me permitieron alcanzar este propósito. A mis compañeros, amigos y en fin a todas las personas que han sido artífices de este logro profesional en mi vida.

TABLA DE CONTENIDOS

MEMORIA

0. OBJETIVOS:	1
1. INTRODUCCIÓN:	4
1.1. Principios generales	7
1.1.1. Redes a presión	7
1.1.2. Clasificación de los flujos	12
1.1.3. Ecuaciones	13
1.2. Redes de riego	30
1.2.1. Elementos necesarios para el diseño	31
1.2.2. Sistemas de riego colectivo	35
1.2.3. Principales criterios para diseñar un sistema de riego	39
1.2.4. Fases del diseño	43
1.2.5. Diseño y dimensionamiento de la red	46
1.2.6. Métodos de riego	54
1.2.7. Componentes de un sistema de riego presurizado	55
1.2.8. Riego localizado	64
1.2.9. Riego por aspersion	72
1.3. Métodos de diseño óptimos	77
1.3.1 Clasificación de las técnicas de optimización	78
1.3.2. Métodos híbridos (MH)	79
1.3.3. Algoritmos genéticos AG	80
1.3.4. Programación lineal	86
1.3.5. Dimensionamiento de redes ramificadas por medio de PL	86
1.3.6. Modelo de PL aplicado al diseño óptimo de una red por turnos	91
1.3.7. Diseño de redes hidráulicas y su coste económico	94
2. DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO	104
2.1. Antecedentes	105
2.1.1. Situación en Ecuador	106
2.1.2. Riego en la Provincia de Loja	114
3. MATERIALES Y MONITOREO:	118
3.1. Instrumental usado	119
3.1.1. Sistema de adquisición de datos (SAD)	119
3.1.2. Estación de ensayos	119
3.2. Monitoreo de parcela	119
4. METODOLOGÍA:	141
4.1. Metodología para optimización de turnos de riego	142
4.1.1 Método PLYAG	143
4.1.2. Método PNLAYAG	165
5. CONCLUSIONES	177
6. TRABAJOS FUTUROS	179
7. REFERENCIAS	181

INDICE DE ANEXOS

ANEXO A: SISTEMA DE RIEGO TUNCARTA	190
ANEXO B: SISTEMA DE RIEGO CARIYACU	204
ANEXO C: CALCULO DE COEFICIENTES	214
ANEXO D: MANUAL BÁSICO DE USO DE DATALOGGER HOBOWARE	224

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Ventajas y desventajas de las redes ramificadas y malladas (Fuertes et al. 2002),	11
Cuadro 2. Valores de rugosidad en tuberías nuevas para diferentes materiales.	22
Cuadro 3. Valores de coeficiente K para diferentes elementos (Fundamentos de cálculo de redes a presión. Análisis de redes)	23
Cuadro 4. Variables a considerar para el diseño de redes de riego.	33
Cuadro 5. Calidad operacional en redes de riego diseñadas a la demanda.	39
Cuadro 6. Función Estándar Normal de Distribución Acumulativa.	51
Cuadro 7. Descripción de tipos de líneas en una sistema de riego	57
Cuadro 8. Grado de sensibilidad de obturación de los emisores	60
Cuadro 9. Pérdidas de carga en longitud equivalente que originan los goteros interlínea.	67
Cuadro 10. Calificación de la instalación de riego en función la valor de CU	71
Cuadro 11. Zonas o regiones climáticas en el Ecuador	106
Cuadro 12. Principales vertientes hidrográficas de Ecuador	107
Cuadro 13. Capacidad y finalidad de los principales embalses en Ecuador.	108
Cuadro 14. PROYECTOS DE RIEGO DEL INERHI	116
Cuadro 15. Elementos equipo control de variables	119
Cuadro 16. Clasificación de goteros usados en campo.	121
Cuadro 17. Tipos de microaspersores	122
Cuadro 18. Tipos de aspersores	123
Cuadro 19. Elementos sistema de riego.	124
Cuadro 20. Funcionamiento de bombas.	126
Cuadro 21. Tipos de filtros que disponemos en el mercado, proporcionada por una de las casas fabricante.	127
Cuadro 22. Características del filtro escogido	127
Cuadro 23. Pérdidas en válvulas	130
Cuadro 24. Especificaciones de manómetros	132
Cuadro 25. Elementos Sistema de Adquisición de Datos (SAD)	135
Cuadro 26. Especificaciones del HOBBO U12-012	136

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Elementos que constituyen las redes a presión (Martínez J., et al. 2009)	7
Figura 2. Clasificación de redes a presión en función de la tipología. (Fuertes V.; et al. 2002)	10
Figura 3. Alimentación desde depósito. (Fuertes et al. 2002)	12
Figura 4. Inyección directa a la red. (Fuertes et al. 2002)	12
Figura 5. Definición de un volumen de control.	14
Figura 6. Elemento rectilíneo de una conducción uniforme (Pérez, 1996)	18
Figura 7. Diagrama de Moody (De L.F. Moody, Trans. ASME, vo.66, 1944)	22
Figura 8. Efecto sobre la línea de energía de una válvula de compuerta intercalada en el ducto	24
Figura 9. Depósito abierto, con bomba y conducto con turbina. (Asignatura Planificación y Diseño de Redes. Máster Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, 2010)	25
Figura 10. Valores del coeficiente K en diversas singularidades	27
Figura 11. Características de una válvula	27
Figura 12. Esquema de una línea que une los nudos i –j (Cabrera et al. 1996)	29
Figura 13. Configuración de una malla (Cabrera et al. 1996)	30
Figura 14. Balance hídrico en el sistema suelo - planta – atmósfera (Lorenzo L. -Universidad Agraria La Molina)	34
Figura 15. La uniformidad de distribución afecta al desarrollo homogéneo del cultivo y a su producción final (Salas et al. 2007)	35
Figura 16. Principales etapas de un proyecto de riego (Lamaddalena y Sagardoy, 2000):	40
Figura 17. Proceso de desarrollo cronológico de un sistema de riego	42
Figura 18. Proceso de desarrollo cronológico de un sistema de riego	42
Figura 19. Aproximación según la distribución Normal (Aliod, 2010)	52

Figura 20. Esquema de un sistema de riego presurizado (Liotta M., s/f)	55
Figura 21. a) Conjunto de hidrociclones. b) Filtro de grava en retro lavado (Liotta M.)	56
Figura 22. Curva característica de emisores: (Salas et al. 2007)	59
Figura 23. a) Gotero de laberinto. b) Goteros tipo vortex (de botón) (Liotta M.)	62
Figura 25. Cinta de exudación (Salas et al. 2007)	63
Figura 26. Red de distribución de una instalación de riego localizado (Salas et al. 2007)	65
Figura 27. Conexión de goteros: a) Goteros interlínea. b) Goteros integrados (Salas et al. 2007)	66
Figura 28. Conexión de goteros integrados (Liotta M.)	66
Figura 29. Laterales y emisores que se deben seleccionar para evaluar una subunidad de riego localizado (Salas et al. 2007)	69
Figura 30. Medida del caudal que suministra los emisores en riego localizado	69
Figura 31. Medida de la presión del agua utilizando un manómetro	70
Figura 32. Componentes de un aspersor de impacto (Salas et al. 2007)	73
Figura 33. Elementos de riego por aspersión (Salas et al., 2007)	74
Figura 34. Diagrama de flujo de un AG básico (Payá, 2007)	84
Figura 35. Línea formada por varios tramos de diferente diámetro (Pérez, 1993)	88
Figura 36. Secuencia para dimensionado óptimo de redes (Pérez, 1993)	91
Figura 37. Costos que se generan en una red de distribución (Pérez, 1993)	95
Figura 38. Amortización con anualidades constantes (Perez, 1993)	98
Figura 39. Variación de costos anuales con el diámetro (Pérez, 1993)	102
Figura 40. Regiones del Ecuador	105
Figura 41. III Censo Agropecuario Nacional.	107
Figura 42. Origen de las aguas para riego en Ecuador (1998)	108
Figura 43. Superficie bajo riego y regada en el sector público y privado en Ecuador (1997).	109
Figura 44. Distritos de riego público (DRP) en Ecuador	110
Figura 45. III Censo Agropecuario Nacional.	110
Figura 46. Cultivos en riego en los Distritos de Riego Públicos (1997)	111
Figura 47. Distribución espacial de las cuencas.	114
Figura 48. Caudales en Cuencas de Loja.	115
Figura 49. Porcentaje de inversión en riego en la Provincia de Loja Loja (RIDRENSUR – LOJA, 2011)	117
Figura 50. Granja experimental	120
Figura 51. Alimentación de líneas de goteo	121
Figura 52. Microaspersor	122
Figura 53. Aspersor	123
Figura 54. Tanque de reserva de 1.500 l.	124
Figura 55. Bomba 1 hp	125
Figura 56. Especificaciones técnicas de la bomba de 1 hp, casa comercial	125
Figura 57. Filtro de Anillas	126
Figura 58. Filtro de Anillas estructura interna	127
Figura 59. Pérdidas del filtro de anillas	128
Figura 60. Válvula de aire	129
Figura 61. Válvulas de Corte	130
Figura 62. Válvula Reductora de Presión	131
Figura 63. Manómetros	132
Figura 64. Contadores	133
Figura 65. Clasificación de dispositivos para medir gasto másico en fluidos (Apuntes de la Asignatura de Gestión de Abastecimientos – 2010)	133
Figura 66. Curva de error (Apuntes de la Asignatura de Gestión de Abastecimientos – 2010)	134
Figura 67. Pérdida de carga en contadores (http://www.regaber.com)	134
Figura 68. Tablero de control de caudalímetros y manómetros electrónicos	135
Figura 69. Tablero de control de variables hidráulicas	136
Figura 70. Caudalímetro y manómetros electrónicos	137
Figura 71. Caudalímetros	138
Figura 72. Caudalímetro electrónico	139

0. OBJETIVOS:

La investigación que se plantea incluye los siguientes objetivos:

- Desarrollar una metodología para el diseño óptimo de redes abiertas de riego a presión funcionando por turnos de riego en redes abiertas a presión, a través de encontrar la combinación de hidrantes óptima para cada turno que se encuentre asignado en los nudos, de modo que se obtenga la solución de diseño más económica.

Para ello se utilizará una forma de optimización híbrida con algoritmos genéticos AG, programación lineal y programación no lineal; en este apartado realizaremos aplicaciones con redes de riego existentes en el entorno.

- Implementar un modelo de la red mediante el monitoreo de variables decisivas en la gestión de la red, para lo cual se instalará una estación de ensayo de emisores: goteros, microaspersores y aspersores. Con ello se logrará obtener un modelo físico de la red instrumentada para diagnosticar su comportamiento hidráulico.
- Generar una guía para el desarrollo del núcleo principal de una plataforma de teleformación para ingenieros y operadores de estas redes. Efectuaremos un protocolo de diseño y operación para sistemas de riego eficientes en la región desde el punto de vista hidráulico.

En este apartado se complementará esta formación con un curso on-line desarrollado específicamente para profesionales que se encuentren involucrados en esta área de la ingeniería.

- Comparar los resultados de optimización obtenidos con otros métodos que existen, para lo cual emplearemos programación lineal y de esta manera encontrar la mejor alternativa técnica económica para el diseño de redes de riego con el uso herramientas ofimáticas como (DIOPRAM 3.0)

Otra aplicación que se utilizará es EVOLVER, que está basada en algoritmos genéticos, y permitirá encontrar la mejor combinación del asignación de turnos de

riego y de esta manera obtener el diseño del sistema de riego con diámetros que garanticen la efectividad en presión y caudal necesarios y con el mínimo coste. Por último lo que se tiene previsto también es cuantificar el rendimiento de emisores que encontramos en el mercado para comprobar el coeficiente la uniformidad de riego de los mismos.

1. INTRODUCCIÓN:

La gestión sostenible, eficaz y equitativa de los recursos hídricos constituye un desafío clave para los próximos cien años, debido a que el consumo de agua se ha incrementado en el doble de la población mundial durante el presente siglo. Considerando que el sector agrícola es uno de los ejes clave para el progreso del país y consumidor de este bien, lo que se pretende en este trabajo es comenzar a resolver los problemas de gestión de las redes de riego presurizadas.

El 70% de todo el agua dulce que procede lagos, cursos de agua y acuíferos, está destinada para fines de la agricultura a nivel mundial, y en países en vías de desarrollo esta cifra alcanza al 90% en donde se irriga las tres cuartas partes de sus tierras. La escasez de agua es más crítica en las zonas más áridas del planeta, en muchas regiones los campesinos deben enfrentarse a problemas de sequías repetidas y la competencia por el agua, en Sudamérica la escasez de agua se prevé que llegue más rápido de lo estimado por el organismo. (FAO, 2007)

Debido al paralelismo que existe en la importancia entre el agua para el abastecimiento directo del ser humano y la que se destina al riego. Mientras a la primera se le ha dado mayor énfasis e importancia debido a que se la consume directamente pues está destinada a los centros poblados; al agua de riego se la ha relegado a un segundo plano, pese a que se la consume indirectamente a través de la agricultura y en países semiáridos alcanza hasta el 80%; lo que ha implicado descuido en la gestión técnica de estas redes.

En las actividades agrícolas, lo más usual en nuestro entorno geográfico es la distribución del recurso hídrico a través de turnos de riego, razón por la cual vamos a implementar una metodología para hacer que esta tarea cumpla parámetros de caudal, presión y recurso energético equilibrado según el requerimiento en los nudos demandantes.

Considerando que las tuberías constituyen uno de los elementos principales de la red de distribución que facilitan el transporte del agua, podemos afirmar que en este tipo de redes la suma de los costos que dependen de las tuberías seleccionadas conforman la parte más importante de la inversión, por tal razón con este trabajo se busca obtener el mínimo costo económico en el diseño de las redes de riego.

Para lograr este propósito que apunte al costo mínimo se usarán técnicas de optimización que han sido tradicionalmente usadas en el diseño de las redes. Murphy (1994) manifiesta que la conexión entre el modelo hidráulico y el modelo de optimización debe ser cuidadosamente diseñado con el fin de proporcionar transparencia al modelo a fin de facilitar la introducción de restricciones y facilitar la consecución de los valores de la función objetivo. El algoritmo de optimización debe elegirse de modo que se facilite su uso y al tiempo que permite el análisis de problemas complejos que involucran múltiples criterios objetivos.

Emplearemos algoritmos basados en el proceso de búsqueda al azar, los mismos que se han utilizado con éxito en una serie de problemas de los recursos hídricos, estos modelos de optimización permiten la introducción de reglas heurísticas así como la asociación con clásicos algoritmos de optimización numérica, razón por la cual usaremos programación lineal conjuntamente con algoritmos genéticos.

El Algoritmo Genético (AG) es un método de optimización basado en la búsqueda del óptimo sobre la base de la selección natural y la genética de poblaciones de la evolución, y especialmente adecuado para tratar los problemas de la red. Tiene la ventaja sobre otras técnicas ya que analiza directamente una población de soluciones factibles, mejorando las poblaciones sucesivas, para llegar a soluciones con un alto rendimiento en los criterios multiobjetivos definidos en el problema. Por otra parte, las funciones objetivo se utilizan directamente sin la necesidad de más información sobre consideraciones tales como la existencia y continuidad, (Goldberg, 1989)

En la actualidad y con el desarrollo y la modernización, se dispone de dispositivos con telemetría, que nos permiten conocer el estado de cada una de las variables que intervienen en la red (puntos de demanda, equipos de bombeo, válvulas, etc.), y que nos permitirán predecir el comportamiento del sistema, para garantizar su buen funcionamiento, el reajuste de las demandas, la optimización del recurso energético, lo que conlleva a una gestión adecuada del recurso agua. En nuestro país está muy poco extendido el control automático (telecontrol) en las redes de riego, lo que ocasiona el derroche del recurso hídrico y la deficiente capacidad de tomar decisiones adecuadas en el momento oportuno; para tal efecto realizaremos el monitoreo de un distrito de riego a pequeña escala para determinar la efectividad de usar esta tecnología.

Otro aspecto importante constituye la capacidad de manejar sistemas de riego por parte del personal encargado de este aspecto, en el presente trabajo desarrollaremos una metodología, que nos permitirá obtener una herramienta para realizar la gestión de la redes de riego en lo referente a la entrega oportuna y eficiente de caudales de demanda y presiones suficientes en cada nudo de entrega; que nos permita adoptar los criterios técnicos para convertir los distritos de riego en áreas potenciales de producción, considerando el costo mínimo en diámetros de tuberías y con reparto de turnos de riego eficiente y oportunos.

1.1. Principios generales

En el desarrollo de la presente investigación vamos a referirnos al riego en carga en el cual el agua fluye por las redes de tuberías a presión.

Estos sistemas a presión se han desarrollado durante las últimas décadas, debido a que se observan considerables ventajas con respecto a los canales abiertos, ya que garantizan un mejor servicio a los usuarios y una mayor eficiencia en la distribución. Por lo tanto, se obtendrá eficiencia en el riego, y una labor más técnica en cuanto a las actividades de mantenimiento, operación y gestión lo que permitirá un buen control y servicio.

1.1.1. Redes a presión

Para definir los elementos que forman parte de las redes de riego presurizadas, mencionamos (Martínez et al. 2009):

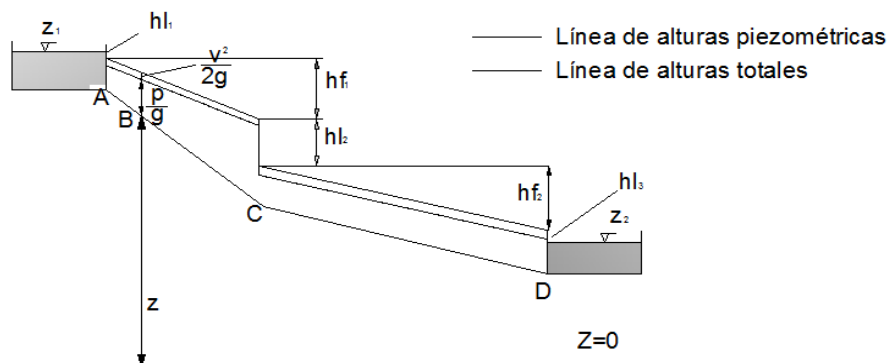


Figura 1. Elementos que constituyen las redes a presión (Martínez J., et al. 2009)

Altura piezométrica, H (m.c.a.). Suma de la cota topográfica y la altura de presión.

Altura total, (m.c.a.). Energía mecánica total por unidad de peso de agua e igual a la suma de la altura de presión de la altura cinética.

Energía total disponible, (m.c.a.). Diferencia de cotas entre los niveles de agua del depósito aguas arriba y del depósito aguas abajo de una conducción por gravedad.

Altura geométrica de elevación, H (m.c.a.). Desnivel entre las cotas de los niveles de agua del depósito aguas arriba y del depósito aguas debajo de una impulsión.

Altura total de elevación de una bomba, H_b (m.c.a.). Incremento de energía total por unidad de peso que experimenta el flujo al pasar a través de la bomba.

La topología de una red está definida por la configuración de las conexiones entre las tuberías y los nudos, estudiaremos a continuación estos elementos constituyentes (Perez, 1993):

Línea. Fragmento de la red que conduce un gasto constante y no tiene ramificaciones.

Tubería. Segmento de línea que posee características físicas constantes (refiriéndonos al diámetro interno).

Nudo. Elemento de la red que se encuentra ubicado al extremo final de una línea, o en el punto de intersección de dos o más líneas. Se distinguen: los nudos fuente que son aquellos que reciben un aporte externo de caudal, los nudos de consumo que son los que aportan caudal al exterior y los nudos de conexión que son aquellos que no aportan ni reciben caudal exterior.

Grado de conectividad. Constituye una característica de la red y es igual al número de líneas conectadas directamente al nudo menos uno,

Si nos referimos a un nudo dentro de un proceso matemático, se denomina nudos de caudal a aquellos nudos en donde es posible conocer los datos de caudal aportados o

consumidos. Y nudos de presión a aquellos en donde los datos de la altura piezométrica son conocidos.

Trayecto (senda o trayecto). Es la sucesión de líneas que se conectan entre sí, y no forman ramificaciones.

Malla. Se define como un trayecto cerrado, que tiene su origen y fin en el mismo nudo.

Redes de distribución. Conjunto de elementos que se conectan entre sí para transportar agua desde los puntos de producción (captación, reserva, pozo, etc.) a los de consumo (bocas de hidrante, edificios, etc.)

Una red de distribución está formada por nudos y líneas que dependiendo de cómo se encuentren conectadas se definirán como ramificadas, malladas y mixtas. Estas redes están constituidas por tuberías y elementos especiales como válvulas, accesorios, hidrantes, elementos de unión, elementos de medición; que deben cumplir con el suministro de las demandas adecuadas y mantener las presiones mínimas para el correcto funcionamiento de la red.

(Fuertes et al. 2002), clasifica a las redes considerando varios criterios:

1. Tipos de redes según su uso

Atendiendo al uso que se vaya a dar al agua suministrada se clasifican en:

- Redes generales de suministro de agua en zonas urbanas.
- Redes de abastecimiento para zonas residenciales.
- Redes de servicio en polígonos industriales.
- Redes exclusivas de riego: cultivos y jardines.
- Redes de uso exclusivo para extinción de incendios.
- Redes para el suministro de gas, petróleo.

Para racionar el recurso hídrico se suele diseñar redes separativas tanto para riego de zonas verdes independientes de las redes para abastecimiento.

2. Tipos de redes según su tipología

En función del tipo de conexión de las tuberías entre sí, se distinguen:

- Ramificadas
- Malladas
- Mixtas

Una red ramificada se caracteriza por su forma arborescente, y dos nudos cualesquiera se conectan por un único trayecto, el caudal circulante por una tubería cualquiera será igual a la suma de los consumos en los nudos situados aguas abajo de la misma. La red mallada se diferencia porque cualquier par de sus nudos se unen por lo menos con dos trayectos, está formada por mallas básicas; y los caudales circulantes por sus líneas no se definen únicamente con las ecuaciones de continuidad; siendo necesario usar ecuaciones de equilibrio de malla para determinarlos.

En las redes mixtas, será factible calcular los caudales circulantes en las arterias ramificadas, lo que no ocurre en las mallas.

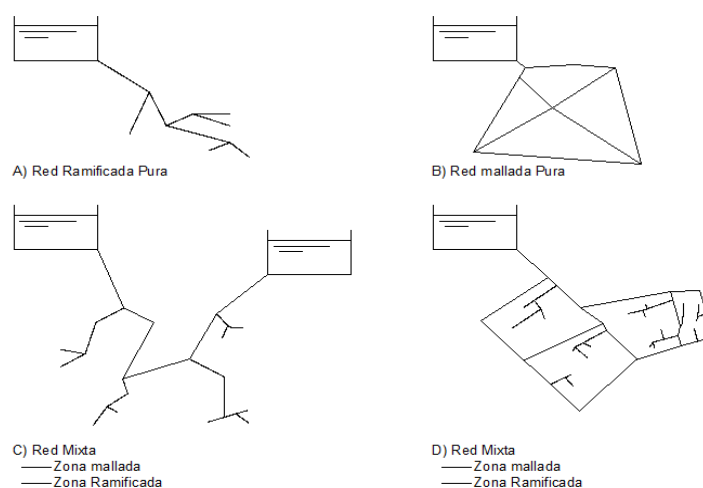


Figura 2. Clasificación de redes a presión en función de la tipología. (Fuertes V.; et al. 2002)

Cuando el valor de la garantía de suministro es menor como es el caso de redes de riego, suministro interior en viviendas, o redes de servicio industrial se usan redes ramificadas, lo

que no ocurre en redes de abastecimiento en donde es prioritario la seguridad del suministro permanente se usarán mallas.

Cuadro 1. Ventajas y desventajas de las redes ramificadas y malladas (Fuertes et al. 2002),

Malladas	Ramificadas
<i>Ventajas</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • Seguridad en el suministro en caso de roturas o cortes de servicio. • Pérdidas de carga menores en el sistema lo que permite altura y presiones semejantes en las acometidas. • Los problemas sanitarios se reducen ya que no se producen estancamiento del agua durante largos periodos de tiempo. 	<ul style="list-style-type: none"> • El coste de implantación de estas menor, con respecto a los costes de inversión inicial. • La regulación de presiones en el sistema es más sencilla debido a que es factible conocer los flujos circulantes en forma anticipada.
<i>Desventajas</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • Su dimensionado es más complejo. • Su costo de implantación es mayor. • La regulación es más compleja ya se necesita contar con un sistema de válvulas para controlar el flujo en las diversas zonas. Pero el equilibrio final de presiones es más sencillo que en las redes ramificadas 	<ul style="list-style-type: none"> • No existe garantía de suministro. • En caso de ser necesario ampliar estas redes se producirá insuficiencia de presión por cuanto no se consideró estos factores al momento de diseñar el sistema inicialmente. • Problemas de calidad de agua en los ramales extremos de ramificaciones.

3. Tipos de redes según el sistema de alimentación

Las redes en general pueden alimentarse por:

- Depósitos a presión atmosférica (elevados o enterrados)
- Inyección directa a red a través de grupos de bombeo (velocidad fija y / o variable)

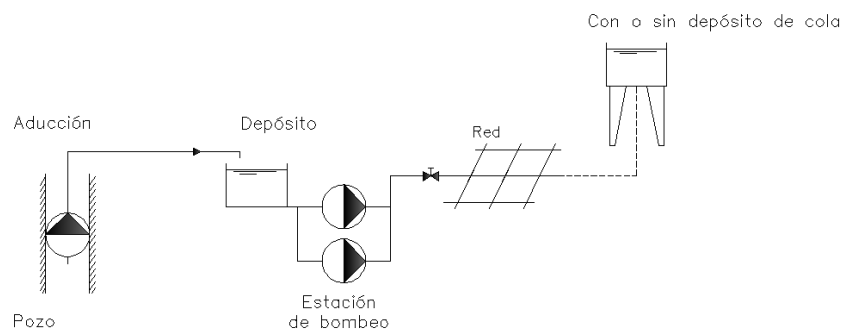


Figura 3. Alimentación desde depósito. (Fuertes et al. 2002)

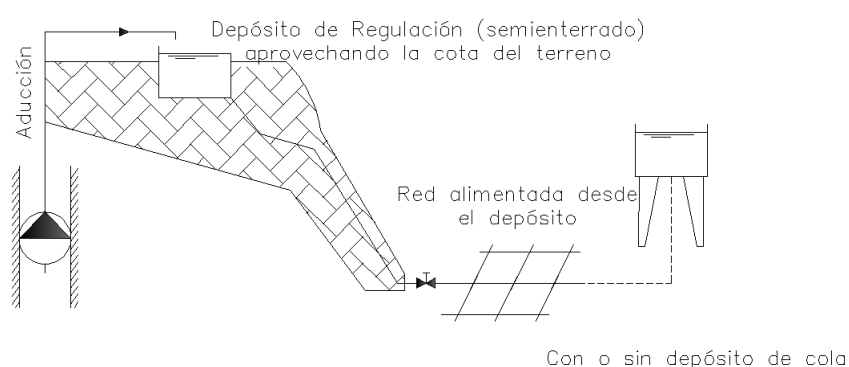


Figura 4. Inyección directa a la red. (Fuertes et al. 2002)

En las redes de distribución también es posible que se presenten otro tipo de depósitos, estaciones de bombeo o rebombeo que regulan y establecen un determinado funcionamiento del sistema; de los que podemos mencionar:

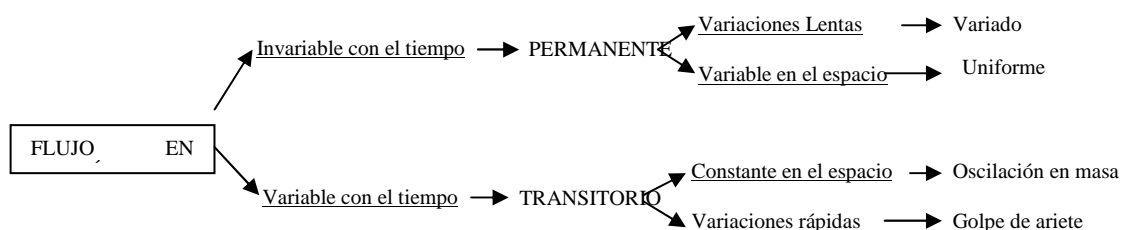
- Depósitos de compensación y cola
- Depósitos reguladores zonales

1.1.2. Clasificación de los flujos

En función de la variación de la velocidad media y presión con el tiempo y en el espacio, el flujo unidimensional se divide en (Martínez et al. 2009):

Flujo permanentes. Aquel que mantiene la velocidad media de circulación y presión constantes en el tiempo en cada instante y en cada sección de la conducción.

Flujo transitorio. Es aquel en el cual la velocidad media y presión experimentan variaciones en el tiempo, es producido debido a la parada y arranque inesperado de una bomba, así como del cierre brusco de una válvula.



Ecuaciones básicas e hipótesis simplificativas:

Las hipótesis simplificativas que se consideran en la modelación de flujos a través de conducciones de características uniformes son:

Hipótesis básicas referidas al flujo:

- Sólo se considera la componente de la velocidad en la dirección del eje de la tubería. (flujo cuasi – unidimensional en conductos con simetría axial)
- La velocidad y la presión se consideran que tienen distribución uniforme en todas las secciones transversales del eje de la tubería.
- Cuando se trate de flujo cuasi-estacionario, se usarán expresiones válidas con el objeto de determinar las pérdidas de carga por fricción y pérdidas localizadas.

Hipótesis básicas referidas al fluido:

- Fluido con alto módulo de compresibilidad
- La variación de la presión depende del flujo, de las propiedades físicas del fluido y la geometría del sistema (fluido monofásico)
- Fluido de características uniformes.
- Fluido verdadero (newtoniano), que sometido a un esfuerzo cortante o tangencial se deforma con velocidad proporcional al esfuerzo aplicado.

1.1.3. Ecuaciones

Ecuación de continuidad

Considerando un determinado volumen dentro de un campo fluido denominado volumen de control, estudiaremos el comportamiento de las partículas que lo atraviesan en una base temporal, delimitado por una superficie denominada superficie de control.

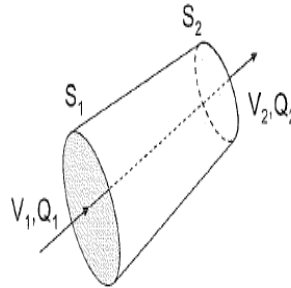


Figura 5. Definición de un volumen de control.

En un volumen de control, la ecuación de continuidad queda definida por el principio de conservación de la masa: “la variación por unidad de tiempo de la masa encerrada en un volumen control es igual a la diferencia entre el gasto másico de entrada y el gasto másico de salida del mismo; que se expresa matemáticamente:

$$\frac{dm}{dt} = G_e - G_s = Q_e \cdot \rho_e - Q_s \cdot \rho_s \quad \text{[Ec. 1.1]}$$

$$\rho = cte \rightarrow \frac{dV}{dt} = Q_e - Q_s \quad \text{[Ec. 1.2]}$$

Cuando se trata un flujo permanente y en el caso de que no existiera entradas o salidas de caudal lateral, resultará un volumen de control constante.

$$\rho \cdot v \cdot A = cte \rightarrow \rho_e \cdot v_e \cdot A_e = \rho_s \cdot v_s \cdot A_s = G \quad \text{[Ec. 1.3]}$$

Por lo general, cuando las presiones no son muy elevadas, se puede considerar que el fluido es incompresible, por lo tanto, $\rho_e = \rho_s$

$$v \cdot A = cte \rightarrow v_e \cdot A_e = v_s \cdot A_s = Q \quad \text{[Ec. 1.4]}$$

Ecuación de la cantidad de movimiento

Considerando un régimen permanente se define como: “la suma vectorial de todas las fuerzas exteriores que actúan sobre el volumen de control, es igual a la diferencia entre la cantidad de movimiento que ingresa en el volumen de control y la que sale del mismo”. Su expresión analítica en la dirección del movimiento para el caso particular de flujo incompresible y considerando una sola sección de entrada y salida del volumen de control tenemos: (Martínez et al. 2009)

$$\sum F_{ext} = \rho \cdot Q \cdot (v_s - v_e) \quad \text{[Ec. 1.5]}$$

A través de esta expresión se determinará la fuerza que ejerce el fluido en movimiento o en reposo, sobre las superficies con las que se encuentra en contacto.

Ecuación de Bernoulli

Si se cumple la premisa de que el fluido es ideal e irrotacional, la ecuación [Ec. 1.8] representa la energía total específica de un fluido, que está determinada por la ecuación de Bernoulli:

$$z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad \text{[Ec. 1.6]}$$

Siendo:

- | | |
|-----------------------|--|
| z.- | cota topográfica, es la altura del eje de la tubería hasta el plano horizontal de referencia, representa la energía potencial gravitatoria por unidad de peso de agua se expresa en (m.c.a.) |
| $\frac{p}{\gamma}$.- | altura de presión, energía potencial de presión por unidad de peso de agua en el eje de la conducción, se expresa en (m.c.a.) |
| $\frac{v^2}{2g}$.- | altura cinética energía cinética de presión por unidad de peso de agua para una velocidad media en la sección, se expresa en (m.c.a.) |
| γ .- | peso específico del fluido (en el caso del agua 9.810 N/m ³) |
| g.- | aceleración de la gravedad (9,81 m/s ²) |

La ecuación de Bernoulli asevera que la energía total por unidad de peso del fluido incompresible se mantiene constante a lo largo de una línea de corriente, considerando que no existen pérdidas por fricción como tampoco aportes de energía. Si asumimos como uniformes la presión y la velocidad en cualquier sección transversal de la conducción, el teorema se generaliza para toda la conducción en lugar de una línea de corriente por lo tanto no existirá variación de la energía total, y ésta puede sufrir transformaciones a lo largo de la conducción.

Si tenemos el caso de que entre dos secciones 1 y 2 de una conducción, existen pérdidas por fricción o aportes de energía, la ecuación [Ec. 1.8] se escribe:

$$B_1 = B_2 + h_{12} \quad \text{o bien} \quad \rightarrow \quad z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_{12} \quad [Ec. 1.7]$$

El término h_{12} toma un valor positivo cuando representa una pérdida y un valor negativo cuando resulta un aporte de energía.

Cuando tratamos de la energía de un fluido, nos referiremos a los siguientes conceptos (Perez, 1993):

Altura geométrica:	z
Altura piezométrica:	$H = z + p/\gamma$
Altura total:	$H_t = z + p/\gamma + v^2/2g$

- *Línea de alturas geométricas (LAG)*. Línea del eje de la conducción, se representa por la cota topográfica del eje de cada sección de la misma y referida al plano horizontal adoptado como referencia.
- *Línea de alturas piezométricas (LAP)*. Representa la altura piezométrica, suma de la energía potencial o altura geométrica y la altura de presión en cada sección medida respecto al plano horizontal de referencia.
- *Línea de alturas totales (LAT)*. Se define como la energía total específica en cada sección del flujo, y resulta de sumar a la línea de alturas piezométricas el valor de la altura cinética. ($v^2/2g$)

Los valores de alturas cinéticas suelen ser despreciables respecto de los valores de las cotas y alturas de presión, cuando consideramos velocidades máximas recomendadas entre 1 y 1.5 m/s, las alturas cinéticas adoptan valores de 0,051 y 0,0144 m.c.a. respectivamente.

En los tramos de la red en donde la sección y el caudal permanecen constantes se obtienen valores de pendiente de la línea de energía constantes, que coinciden con la pérdida de carga unitaria (pendiente hidráulica).

Ecuaciones para el cálculo de pérdidas de carga

Pérdidas por fricción

Estudiaremos ahora, las pérdidas friccionales que se dan en el interior de las conducciones por efecto del rozamiento con el fluido.

$$Z_a + \frac{P_a}{\gamma} = Z_b + \frac{P_b}{\gamma} = \text{cte} = z + \frac{P}{\gamma} \quad [\text{Ec. 1.8}]$$

Según manifiesta Pérez (1996), para deducir las pérdidas de carga en una conducción en régimen permanente y uniforme se parte de la aplicación de la ecuación de la cantidad de movimiento a un tramo de una conducción, como el que se muestra en la figura 6, en donde p_1 y p_2 son las presiones a la entrada y salida de la conducción. A_1 y A_2 representan las secciones de la conducción en los extremos, P es el perímetro de una sección transversal de la conducción transversal al flujo. ΔL es la longitud del tramo, T es la tensión tangencial en las paredes de la conducción.

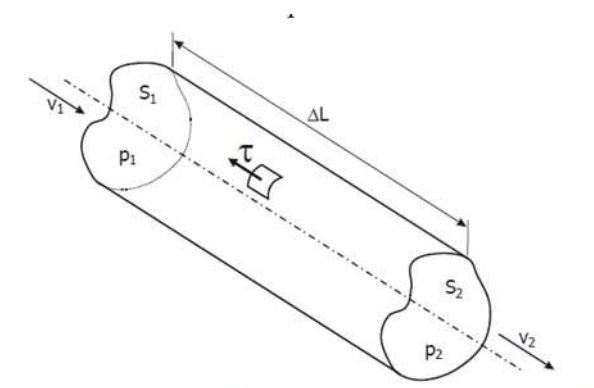


Figura 6. Elemento rectilíneo de una conducción uniforme (Pérez, 1996)

Suponemos en el elemento de la figura que las secciones son iguales a la entrada y salida de la misma, ($A_1=A_2$) y por tanto las velocidades ($v_1=v_2$) también son iguales. Por tanto al tratarse de flujo uniforme, tomando T constante en todo el tramo, y de la aplicación de la ecuación de la cantidad de movimiento resulta:

$$P_1 \cdot A_1 - P_2 \cdot A_2 = (P_1 - P_2) \cdot A = \tau \cdot P \cdot \Delta L \quad \rightarrow \quad \tau = \frac{\Delta P}{\Delta L} \cdot \frac{A}{P} = \gamma \cdot J \cdot R_h \quad [Ec. 1.9]$$

Siendo:

- γ .- peso específico del fluido
- J .- pérdida unitaria (o pendiente hidráulica)
- R_h .- radio hidráulico

En el caso de un conducto de sección circular, el radio hidráulico será:

$$A = \pi R^2 \text{ y } P = 2\pi R, \quad \rightarrow \quad R_h = \frac{R}{2} = \frac{D}{4} \quad [Ec. 1.10]$$

Según Fuertes (2000), existen diferentes expresiones alternativas para representar la pérdida de carga continua o la pendiente hidráulica, mencionaremos las más empleadas:

Fórmula de Darcy–Weisbach (DW)

Propuesta inicialmente por Weisbach en el año de 1855 y luego por Darcy en 1875, y considera que la pendiente hidráulica se expresa como:

$$J = \frac{f}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = \frac{8 \cdot f}{\pi^2 \cdot D^3 \cdot g} Q^2 \quad [Ec. 1.11]$$

Esta ecuación es muy usada en la ingeniería debido a que posee gran consistencia adimensional.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{k_s}{3,7 \cdot D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad [Ec. 1.12]$$

Donde el coeficiente $f = f(Re, \varepsilon_r)$ de la fórmula de Darcy Weisbach recibe el nombre de factor de fricción.

En régimen laminar ($Re < 2000$) el factor de fricción depende sólo del número de Reynolds. La velocidad media en la tubería para un perfil parabólico de velocidades es:

$$v = \frac{1}{4\mu} \cdot \left(\frac{dp}{dx}\right) \cdot (r^2 - R^2) \rightarrow \bar{v} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R v(r) 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr = \frac{-1}{8\mu} \cdot \left(\frac{dp}{dx}\right) \cdot [Ec. 1.13]$$

Y el gradiente de presiones dp/dx es constante, se obtiene:

$$-\frac{dp}{dx} = -\frac{\Delta p}{\Delta x} = \frac{\gamma \cdot J \cdot \Delta x}{\Delta x} = \gamma \cdot J \quad [Ec. 1.14]$$

Si introducimos este resultado en la ecuación del campo de velocidades tenemos:

$$\bar{v} = \frac{\gamma \cdot J}{8\mu} R^2 = \frac{\gamma \cdot J \cdot D^2}{32\mu} = \frac{\rho \cdot g \cdot J \cdot D^2}{32\mu} = \frac{g \cdot J \cdot D^2}{32\nu} \quad [Ec. 1.15]$$

De donde despejamos el valor de la pendiente hidráulica J, obtenemos:

$$J = \frac{32 \cdot \nu \cdot \bar{v}}{g \cdot D^2} = \frac{64 \cdot \nu}{\bar{v} \cdot D} \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{\bar{v}^2}{2g} = \frac{64}{Re} \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad [Ec. 1.16]$$

Por analogía con la fórmula de DW, se obtiene que el factor de fricción f para régimen laminar, conocida como fórmula de Poiseuille es:

$$f = \frac{64}{Re} \quad [Ec. 1.17]$$

En el caso del régimen turbulento ($Re > 4000$), el factor de fricción depende, en general del número de Reynolds (Re) y de la rugosidad relativa ϵ_r ,

En ocasiones f está función únicamente de Re, como se evidencia en la ecuación propuesta por en 1911, Blasius:

$$f = 0.3164 \cdot Re^{-0.25} \quad [Ec. 1.18]$$

válida para tuberías hidrodinámicamente lisas con valores de Re iguales a $3E-3$ que significa que la capa límite turbulenta desliza sobre la subcapa laminar sin verse afectada por la rugosidad de las paredes de la tubería.

En 1935, Prandtl propone una expresión implícita de f, para tuberías hidrodinámicamente lisas,

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left[2.5 \frac{51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right] \quad [Ec. 1.19]$$

que es aplicable a un rango de Re mayor que la de Blasius.

Von Karman propone en 1938 una ecuación para el factor de fricción partiendo del límite de la turbulencia totalmente desarrollada, es decir cuando f ya no depende del número de Reynolds:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log_{10} \left[\frac{\epsilon_r}{3.7} \right] \quad \text{[Ec. 1.20]}$$

válida para tubos rugosos con flujo turbulento plenamente desarrollado, es decir que cuanto mayor sea el valor de Re menor será el espesor de la subcapa laminar, resultando mayor la influencia por parte de la turbulencia y menor por la viscosidad del fluido.

Colebrook en 1939 presentó una ecuación para el cálculo del factor de fricción en función del número de Re y de la rugosidad relativa ϵ_r , que es válida para flujo en régimen turbulento ($Re > 4000$) y se la conoce con el nombre de ecuación de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log_{10} \left[\frac{\epsilon_r}{3.7} + \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right] \quad \text{[Ec. 1.21]}$$

De donde se observa que el factor de fricción f es una función no explícita del número de Reynolds y de la rugosidad relativa, lo que imposibilita obtener el valor de f en forma directa.

Por tanto surgieron otras ecuaciones como la fórmula de Swamme y Jain (1976),

$$f = \frac{0.25}{\left[\log_{10} \left(\frac{5.74}{Re^{0.9}} + \frac{\epsilon_r}{3.7} \right) \right]^2} \quad \text{[Ec. 1.22]}$$

Fórmula de Hazen-Williams (HW)

En el año de 1903, Hazen y Williams proponen una expresión que usando unidades métricas resulta:

$$v = 0.355 \cdot C_H \cdot D^{0.63} \cdot J^{0.54} \quad \text{[Ec. 1.23]}$$

Siendo:

- L.- longitud de la tubería
- C_H - coeficiente de Hazen-Williams, (función del material de la tubería)

D.- diámetro de la tubería

Un mayor valor del coeficiente de Hazen Willams representa una tubería de mejor calidad, ejemplo ($C_H = 140$) para tubería de PVC nueva, y para valores menores se tratará de tuberías de baja calidad con mucho tiempo de uso, incrustaciones, etc.

Fórmula de Manning-Strickler-Gauckler

En términos de carga pérdida de carga h_f y de caudal Q , para una tubería de diámetro D obtenemos:

$$h_f = 10'29 \cdot n^2 \cdot \frac{L}{D^{16/3}} \cdot Q^2 = \frac{10'29}{K_s^2} \cdot \frac{L}{D^{16/3}} \cdot Q^2 \quad [Ec. 1.24]$$

Los valores de coeficiente de Manning (n) para tuberías de fibrocemento son del orden de 0'0095 a 0'0105 y para tuberías de fundición 0'0125.

Cuadro 2. Valores de rugosidad en tuberías nuevas para diferentes materiales.

Material	Rugosidad
PVC y PE	0'0025
Fibrocemento	0'025
Fundición revestida	0'030
Fundición no revestida	0'150
Hierro galvanizado	0'150
Hormigón armado	0'100
Hormigón liso	0'025

También contamos con gráficas propuestas por Moody quien en 1944 publicó los resultados de sus ensayos en laboratorio a través de los diagramas de Moody que permiten determinar el valor del factor de fricción f en función del número de Reynolds y del valor de la rugosidad relativa de una tubería. Este diagrama, es una representación log-log del factor de fricción (f) frente al número de Re tomando como parámetro la rugosidad relativa de la tubería (ϵ_r), es aplicable a cualquier líquido y tipo de flujo.

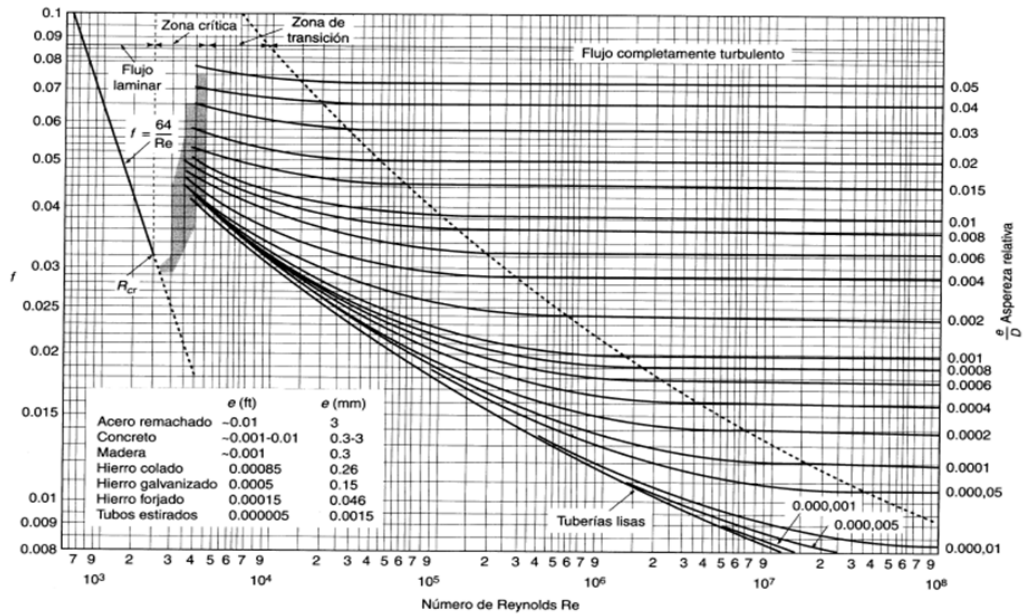


Figura 7. Diagrama de Moody (De L.F. Moody, Trans. ASME, vo.66, 1944)

Pérdidas locales

En toda red se incluyen elementos que facilitan el trazado de la red de acuerdo a la topografía del terreno, así como para empalmar y derivar tuberías (codos, juntas, tees, collarines). Así como también los dispositivos de control del flujo como válvulas de compuerta, de mariposa, de lenteja, de aire, reductoras de presión, estrechamientos, etc.

Estos elementos originan pérdidas que se denominan pérdidas localizadas, locales, singulares o menores; que en forma usual evalúan como el producto de la altura cinética por un coeficiente de pérdidas k, en la siguiente forma:

$$h = k \cdot \frac{v^2}{2g} = \left[\frac{8 \cdot k}{\pi^2 \cdot g \cdot D^4} \right] Q^2 \quad \text{[Ec. 1.25]}$$

Siendo:

- v.- velocidad del fluido aguas debajo de la alteración del flujo
- D.- diámetro del accesorio
- k.- coeficiente adimensional

El valor de k está en función del número de Re y de las características del accesorio.

Cuadro 3. Valores de coeficiente K para diferentes elementos (Fundamentos de cálculo de redes a presión. Análisis de redes)

Elementos o accesorios	K
-------------------------------	----------

Válvula de globo	10'0
Válvula de ángulo	5'0
Válvula de retención de clapeta	2'5
Válvula de compuerta	0'2
Coso de radio pequeño	0'9
Codo de radio medio	0'8
Codo de radio grande	0'6
Codo a 45 ⁰	0'4
Codo cerrado inversor de flujo	2'2
Te estándar – dirección de paso	0'6
Te estándar – dirección de desvío	1'8
Entrada recta	0'5
Salida brusca	1'0

Estas pérdidas también se expresan en función de la longitud del tubo equivalente L_e , que es la longitud de tubería para la cual se produciría similar pérdida de carga que el accesorio interpuesto:

$$f \cdot \frac{L_e}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} = k \cdot \frac{v^2}{2g} \quad \text{[Ec. 1.26]}$$

Que es igual:

$$L_e = k \cdot \frac{D}{f} \rightarrow h_m = \frac{8 \cdot f \cdot L_e}{\pi^2 \cdot g \cdot D_{tub}^5} \cdot Q^2 \quad \text{[Ec. 1.27]}$$

En la práctica se incluye el total de las pérdidas que ocasionan, adicionando la longitud de cada tubería en la longitud equivalente de los accesorios de los que consta, o mayorando las pérdidas de carga de las tuberías en un porcentaje variable del 5 al 10%.

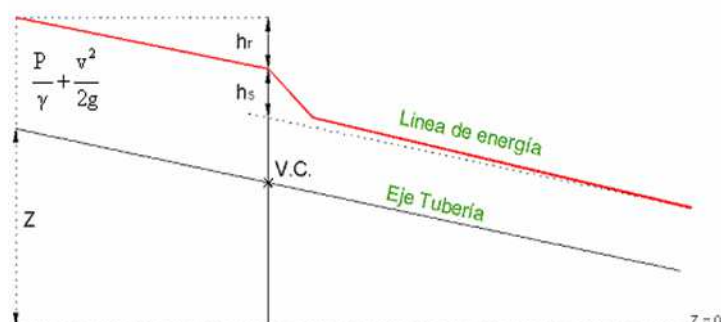


Figura 8. Efecto sobre la línea de energía de una válvula de compuerta intercalada en el ducto

Considerando la diferencia entre las pérdidas por fricción y localizadas, se puede escribir Bernoulli como:

$$B_1 = B_2 + h_{f,12} + h_{m,12} \quad \text{[Ec. 1.28]}$$

En el caso de un depósito abierto, todos los puntos de la superficie libre tienen energía específica $H_t=z$

Cuando en el sistema existe un sistema de bombeo (aporte de energía)

$$H_{t,1} + H_{bomba} = H_{t,2} + h_{1,2} \quad [Ec. 1.28]$$

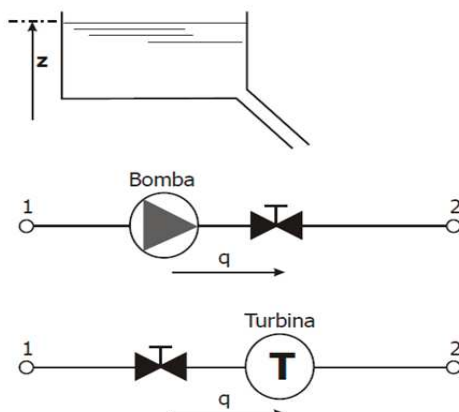


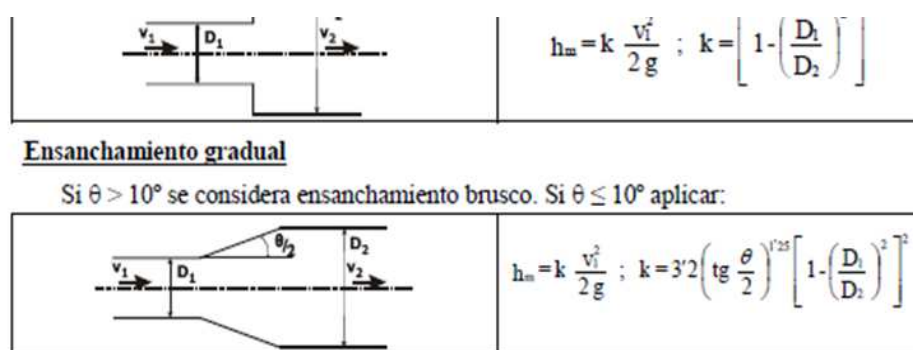
Figura 9. Depósito abierto, con bomba y conducto con turbina. (Asignatura Planificación y Diseño de Redes. Máster Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, 2010)

Si se trata del caso de una turbina (consumo de energía):

$$H_{t,1} = H_{t,2} + H_{turbina} + h_{1,2} \quad [Ec. 1.29]$$

Las ecuaciones que rigen el funcionamiento de una red de distribución en régimen permanente, se clasifican en dos grupos: ecuaciones generales de equilibrio y las ecuaciones características que describen el funcionamiento de los elementos de la red.

En la figura 10 se encuentran los valores del coeficiente de pérdidas k , para singularidades más comunes, cuando se trata de un régimen turbulento completamente desarrollado.



Entrada a depósito

	$h_m = k \frac{v^2}{2g}$ <ul style="list-style-type: none"> a) Acampañada : $k = 0'1$ b) Recta : $k = 1'0$ c) Encastrada : $k = 1'0$

Contracción brusca

	$h_m = k \frac{v_2^2}{2g} ; k = 0'5 \left[1 - \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \right]^2$
--	--

Contracción gradual

	$h_m = k \frac{v_2^2}{2g} ;$ <ul style="list-style-type: none"> a) Ordinaria : $k = 0'25$ b) Acampañada : $k = 0'10$ c) Redondeada : $k = 0'04$

Entrada desde depósito

	$h_m = k \frac{v^2}{2g}$ <ul style="list-style-type: none"> a) Acampañada : $k = 0'04$ b) Recta : $k = 0'5$ c) Encastrada : $k = 1'0$

Codo curvo

	$h_m = k \frac{v^2}{2g} ; k = \left[0'131 + 1'847 \left(\frac{D}{2r} \right)^{3'5} \right] \frac{\theta (^{\circ})}{90^{\circ}}$
--	--

Codo recto

	$h_m = k \frac{v^2}{2g}$ <ul style="list-style-type: none"> $k (\theta = 30^{\circ}) = 0'25$ $k (\theta = 60^{\circ}) = 0'75$ $k (\theta = 90^{\circ}) = 1'80$
--	--



Figura 10. Valores del coeficiente K en diversas singularidades

En el caso de válvulas, el valor del coeficiente k dependerá de su grado de apertura; cuanto más cerrada se encuentre, mayor será el valor de pérdida de carga y del coeficiente k. La pérdida de carga en una válvula en función del caudal, se expresa:

$$h_v = k(\theta) \cdot Q^{n(\theta)} \quad [\text{Ec. 1.30}]$$

Siendo:

- θ.- grado de apertura de la válvula.
- n(θ).- adopta un valor aproximado de 2.

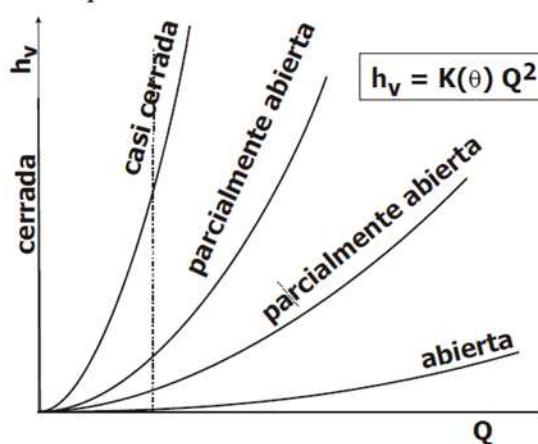


Figura 11. Características de una válvula

En la industria de las válvulas es muy usual que se emplee la siguiente expresión:

$$Q = K_v(\theta) \cdot \sqrt{\Delta p} \quad [\text{Ec. 1.31}]$$

Siendo:

- Δp .- pérdida de presión en la válvula
- K_v .- coeficiente de pérdida de carga

Las unidades de K_v , están en función de las unidades que se expresa el caudal y la pérdida de carga y viene presentado en catálogos. Aunque también se indica el coeficiente ($K_{v,0}$) a

válvula abierta y la variación del cociente ($K_v/K_{v,0}$) con el grado de apertura de la válvula θ .

Ecuaciones generales de equilibrio

Son una particularización de las ecuaciones generales de conservación de la masa y la energía, aplicadas a un flujo incompresible a través de un sistema de tuberías a presión; estas leyes son denominadas como leyes de Kirchoff.

Las variables que intervienen en este modelo son:

- Los caudales q internos que circular por todas las líneas
- Los caudales Q externos aplicados en los nudos
- La altura piezométrica en los nudos H y su presión p .
- La pérdida de carga en cada línea, o las diferencias de alturas piezométricas entre sus nudos extremos, que denominaremos h .

PRIMERA LEY.-

Establece que la suma neta de todos los caudales que confluyen en un nudo debe ser nula, esto para caudales externos e internos y supone que se ha adoptado un cierto criterio de signos en forma previa. Si para este caso asumimos que el caudal interno q es negativo en el caso en que entre en un nudo, y positivo cuando sale; por tanto para los caudales externos adoptaremos el criterio contrario.

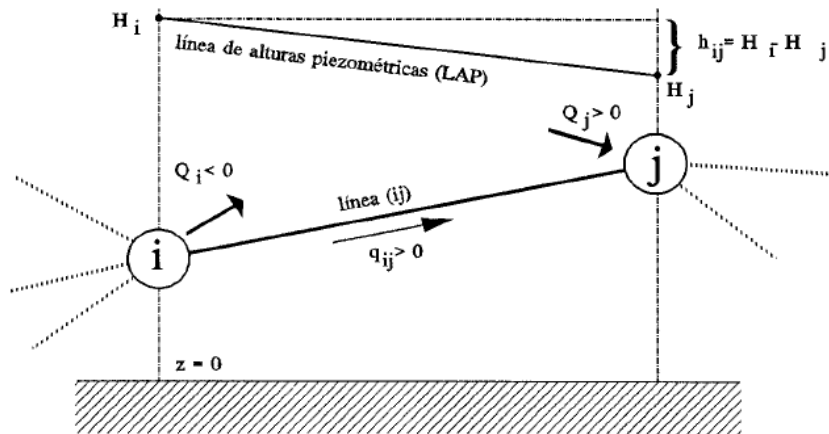


Figura 12. Esquema de una línea que une los nudos i -j (Cabrera et al. 1996)

La nomenclatura y el criterio de signos adoptado en la figura 12 es:

- q_{ij} : caudal que circular entre los nudos i y j, considerando positivo en el caso de la figura cuando circula del nudo i hacia el nudo j.
- Q_i : caudal inyectado en el nudo i, considerándose positivo si es entrante (aporte) y negativo cuando es saliente (consumo)
- H_i : altura piezométrica en el nudo i
- h_{ij} : pérdida de carga en la línea ij

De esta manera la ecuación de la continuidad se expresará:

$$\sum_{j \in A_i} q_{ij} - Q_i = 0 \quad \text{o} \quad \sum_{j \in A_i} q_{ij} = Q_i \quad i = 1 \dots \dots \dots N \quad \text{[Ec. 1.32]}$$

Siendo:

- j: todos los nudos conectados directamente al nudo i
- N: número total de nudos de la red

Para que se verifique el principio de continuidad en toda la red, la suma neta de aportes y consumos externos debe ser nula:

$$\sum_{i=1}^N Q_i = 0 \quad \text{[Ec. 1.33]}$$

Ahora el sumatorio estará extendido a los nudos N de la red.

SEGUNDA LEY.-

Establece que la suma algebraica de las pérdidas de carga debe ser nula a lo largo de cualquier malla.

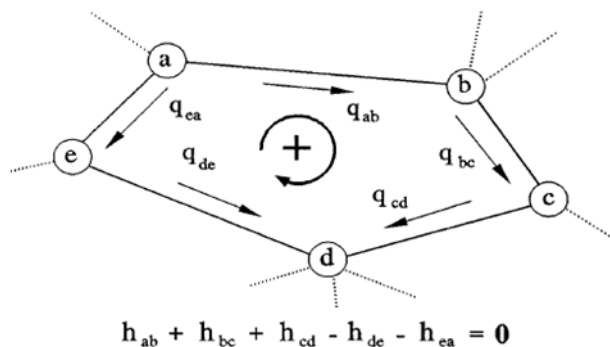


Figura 13. Configuración de una malla (Cabrera et al. 1996)

Para esto es necesario establecer un nuevo criterio de signos; dotamos a la malla de la figura 13 de un sentido de recorrido horario, es decir la pérdida de carga se considera positiva cuando el caudal recorre el circuito en el mismo sentido de la malla y negativa en caso contrario. Por tanto la segunda ley de Kirchoof, que se aplicará a M mallas independientes de la red, se expresa:

$$\sum_{(ij) \in B_k} (\pm) h_{ij} = 0 \quad k = 1 \dots \dots M \quad \text{[Ec. 1.34]}$$

Siendo:

B_k : representa el conjunto de líneas pertenecientes a la malla k .

$(\pm)_{ij}$: toma el valor (+1) si el sentido hipotético del caudal q_{ij} es el mismo que el de la malla, y (-1) si toma el sentido contrario.

1.2. Redes de riego.-

Un sistema en general es el método que se emplea para transportar el agua desde de la red de distribución hasta las parcelas de demanda. (Solera y Fullana, 2001).

Los sistemas de riego a presión se han desarrollado en los últimos años, ya que permiten una adecuada gestión de los recursos hídricos, y control del flujo para garantizar la distribución del recurso a los usuarios, consiguiendo mayor eficiencia en la líneas de distribución; por tanto, una mayor superficie de riego puede ser servida con igual cantidad de agua. Para lograr este objetivo existen alternativas técnicas innovadoras que nos permitirán ser eficientes en el riego, implementando actividades de operación, mantenimiento y gestión para cumplir con el nivel de servicio requerido. De tal manera que la gestión del recurso hídrico sea efectiva a través del cobro de tarifas basadas en el volumen de agua consumida, que es más factible auditarlo en este tipo de redes a diferencia de los sistemas de canal abierto (Lamaddalena y Sagardoy, 2000).

Con el objeto de manejar en forma eficiente los sistemas de riego, se ha recurrido a diversas técnicas de diseño, así Planells et al. (1999) manifiestan que el desarrollo de nuevas tecnologías y su incorporación a las actividades de riego para mejorar la eficiencia de aplicación del recurso hídrico y la optimización de energía, fertilizantes, etc., se ha originado por diferentes factores que son mencionados a continuación:

- Lograr un equilibrio con el medio ambiente, a través de disponer de agua suficiente para riego, aunque exista mayor demanda.
- Reducir los costos de producción para ser competitivos.
- Evitar la contaminación, producto del mal manejo del agua o el uso desenfrenado de la misma.

1.2.1. Elementos necesarios para el diseño

Con el propósito de hacer efectivo el funcionamiento de las redes de riego se cumplirán dos fases esenciales, el diseño agronómico e hidráulico.

A. Diseño agronómico

Su finalidad es lograr que la instalación de riego sea capaz de suministrar la cantidad suficiente de agua, con un control efectivo de las sales y una buena eficiencia en la aplicación del agua; para lo cual consideraremos:

- **Cálculo de las necesidades de agua de los cultivos.**

Las necesidades totales vienen definidas por la ecuación:

$$N_t = \frac{N_n}{E_a} = \frac{N_n}{R_p \cdot F_1 \cdot F_r \cdot C_U} \quad [Ec. 1.35]$$

Siendo:

N _t :	necesidades totales (mm/día)
N _n :	necesidades netas (mm/día)
E _a :	eficiencia de aplicación
R _p :	relación de percolación, tanto por uno
F ₁ :	fracción de percolación, tanto por uno
F _r :	factor de rocío, tanto por uno
C _U :	coeficiente de uniformidad, tanto por uno

- **Determinación de los parámetros de riego**

Luego de conocidas las necesidades hídricas de los cultivos se determinarán los distintos parámetros de riego como son: dosis, intervalos entre riegos, caudal necesario, duración del riego, número de aspersores y disposición de los mismos.

La dosis de riego es la cantidad de agua que se aplica en cada riego por cada unidad de superficie. Aquí se distinguen la dosis neta (D_n) y dosis bruta o total (D_t), la primera corresponde a la reserva fácilmente disponible, y viene dada por la ecuación:

$$D_n = 100 \cdot P_r \cdot D_a \cdot (C_c - P_m) \cdot f \quad [Ec. 1.36]$$

Siendo:

D _n :	dosis neta, reserva disponible fácilmente (m ³ /ha)
P _r :	profundidad de raíces (m)
D _a :	densidad aparente del suelo
C _c :	capacidad de campo, expresado en porcentaje en peso de suelo seco
P _m :	punto de marchitamiento, expresado en porcentaje en peso de suelo seco

f: fracción de agotamiento del agua disponible, expresada en tanto por uno

La dosis total es igual:

$$D_t = \frac{D_n}{E_a} \quad \text{[Ec. 1.37]}$$

Ea: eficiencia de aplicación

Se debe regar cuando las extracciones de las plantas agoten la reserva fácilmente disponible. Por consiguiente, el intervalo (I) en días será:

$$I = \frac{D_n}{N_n \text{ diarias}} = \frac{D_n}{E_t \text{ cultivo} - P_e} \quad \text{[Ec. 1.38]}$$

Et: evapotranspiración

Pe: profundidad radicular efectiva

Para alcanzar un reparto uniforme y eficiente del agua, necesitamos de la siguiente información:

Cuadro 4. Variables a considerar para el diseño de redes de riego.

Variable	Características
Suelo	Densidad aparente, capacidad de campo, punto de marchitamiento, profundidad y velocidad de infiltración estabilizada.
Clima	Temperatura, humedad relativa, precipitación, evaporación diaria, radiación solar y el viento.
Cultivo	Necesidades hídricas, fracción de agotamiento del agua disponible, profundidad radical, marco de plantación, labores.
Parcela	Dimensiones, topografía, lugar de captación de agua, área a regar, linderos.
Agua	Caudal disponible y calidad agronómica
Riego	Tiempo disponible para regar en el día, método de riego,

	características del emisor así como su espaciamiento, eficiencia de riego.
--	--

Relacionando los tres factores suelo – agua – planta debemos considerar de vital importancia aspectos como:

- La velocidad de infiltración de agua en el suelo.
- La capacidad de retención de agua en el suelo.
- Las características del flujo del agua en el suelo.
- La magnitud de la profundidad del sistema de raíces, que es característica de cada especie.
- La cantidad de agua que necesita el cultivo para su crecimiento y desarrollo.

Conociendo estos procesos y sus relaciones mutuas lograremos el uso eficiente del recurso hídrico, así como tecnificar y modernizar el riego.

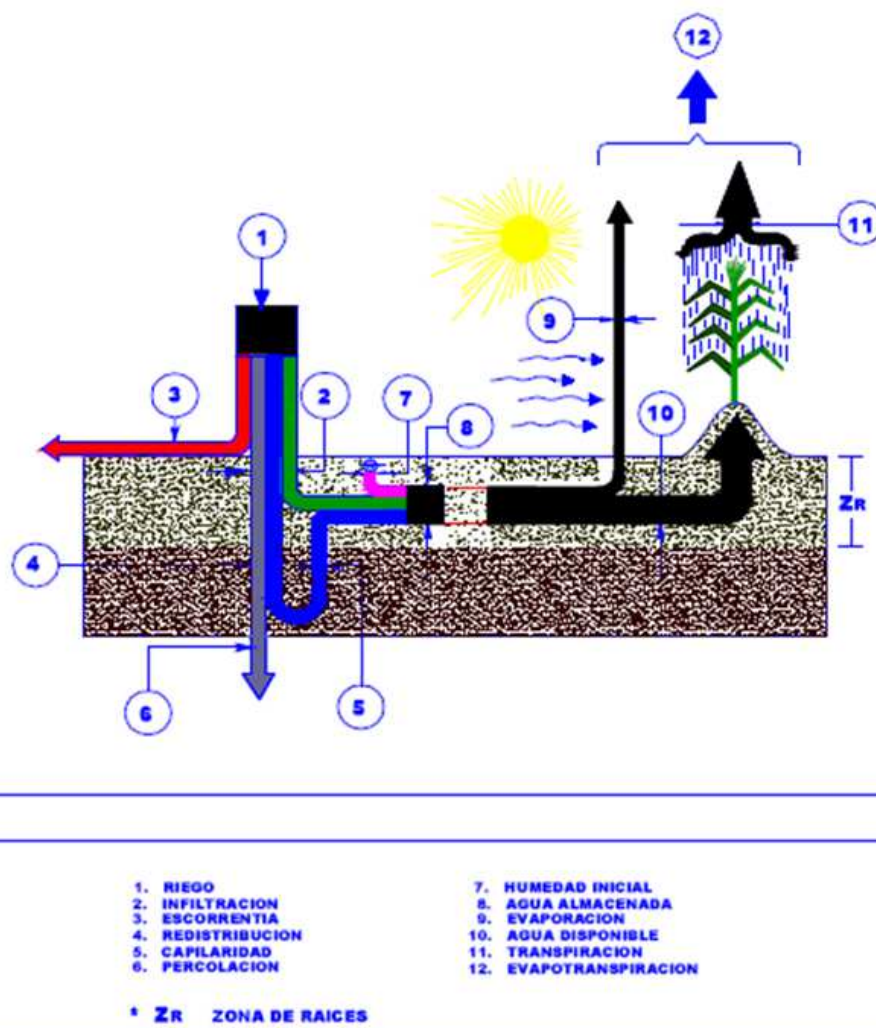


Figura 14. Balance hídrico en el sistema suelo - planta – atmósfera (Lorenzo L. -Universidad Agraria La Molina)

B. Diseño hidráulico

Con el objeto de aplicar el agua suficiente y de acuerdo a la etapa de desarrollo del cultivo, se realizará el trazado y dimensionamiento óptimo. De igual manera se buscará que la aplicación del agua sea suficientemente uniforme, con el objeto de obtener buenas producciones con el menor gasto de agua.

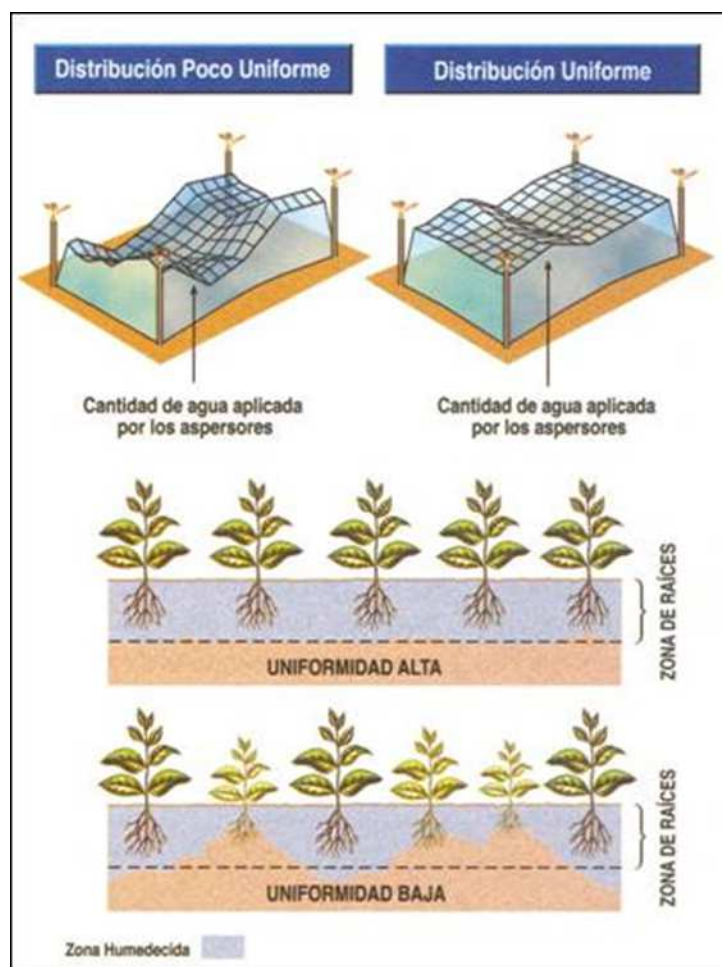


Figura 15. La uniformidad de distribución afecta al desarrollo homogéneo del cultivo y a su producción final (Salas et al. 2007)

1.2.2. Sistemas de riego colectivo

Es el sistema formado por elementos que permiten la captación, almacenamiento y regulación, tratamiento y transporte del agua desde su origen hasta cada una de las tomas en parcela, llegando en las debidas condiciones de presión y caudal de tal manera que garantice el correcto funcionamiento del riego en parcela. (Arviza, 2007)

Montiel realiza una caracterización de este tipo de redes, y destaca las ventajas de realizar las labores de regadío a través de estos sistemas de distribución a presión:

- Permiten obtener longitudes menores ya que no dependen del trazado a la parcela.
- Proporcionan mayor facilidad y flexibilidad en el trazado de la red, puesto que es independiente de la topografía del sector.

- Reducen las pérdidas de agua en las conducciones ya sea por filtración, evaporación, fugas por estructuras y operación.
- Permiten realizar las labores de riego en forma sencilla.
- Mayor eficiencia en la aplicación del agua.
- Control del volumen de agua suministrado.

Elementos de un sistema de riego colectivo

En resumen podemos encontrar los siguientes elementos dentro de una red colectiva de riego (Arviza y Balbastre, s/f)

- Obra de captación.- Que puede ser de agua superficial o subterránea.
- Sistema de bombeo.- Cuando es necesario emplear este dispositivo para impulsar el agua a presión.
- Obras de regulación y/o almacenamiento.- Depósito, calderín, torre de carga, balsa que funcionan con caudal variable y las bombas que proporcionarán un caudal constante.
- Red de distribución. Está formada por las redes que transportan el agua hasta los hidrantes, estación de filtración, estación de fertirrigación.
- Tomas de riego o hidrantes. Llamados también bornas o bocas de riego, constituyen el punto final de la red colectiva, e inicial de la red privada en finca; se las instala enterradas y se abastecen directamente de la red de distribución; pueden ser individuales o colectivas según se instalen en una o varias parcelas respectivamente, deben ser colocadas dentro de una estructura de protección. (Fuertes et al. 2002)
- Elementos de control, de regulación, protección y maniobra (válvulas, ventosas, reguladores de presión, dispositivos anti ariete.)
- Sistema de riego en parcela.

Definiciones importantes:

(Aliod et al. 2010) define ciertos parámetros importantes como son:

1. *Demanda de agua mensual.* Volumen de agua que es necesario cubrir a lo largo del año, o durante la campaña de riego. Se lo expresa en términos de caudal ficticio por

cultivo y por mes. En particular para el cálculo de los caudales de diseño se fijará la mayor demanda mensual a usar (Clément y Galand, 1986)

2. *Rendimiento de la red, (r)*. Es la relación entre el tiempo de disponibilidad efectiva de la red en el período de máxima demanda, y el tiempo de duración del periodo referido.

$$\mathbf{JER = r \cdot 24} \qquad \mathbf{[Ec. 1.39]}$$

Siendo:

JER: jornada efectiva de riego, (h), tiempo de disponibilidad efectiva de la red con respecto a las 24 horas del día.

El rendimiento de la red, viene expresado como:

$$\mathbf{r = t''/t} \qquad \mathbf{[Ec. 1.40]}$$

Siendo:

t'': número de horas en que la red está capacitada para transportar la dotación diaria

t: número de horas disponibles para riego por lo general se tomará 24 horas

El valor de este parámetro es siempre cercano a la unidad.

3. *Probabilidad de funcionamiento (p)*. La probabilidad de funcionamiento de un hidrante, se define como el cociente entre el caudal ficticio continuo y el caudal instantáneo unitario por hectárea disponible en el hidrante, se expresa:

$$\mathbf{p = \frac{q_f \cdot S}{q_D}} \qquad \mathbf{[Ec. 1.41]}$$

Siendo:

S: superficie servida en ha

q_f: caudal ficticio continuo

q_D: dotación suministrada por hidrante en l/s

4. *Superficie neta (A)*. Área que riega cada hidrante; en ocasiones se afecta con términos de corrección que se introducen por factores a considerar como zonas, diferencias de tamaño de sectores en las parcelas, etc. (IRIDA, 1985).
5. *Dotación de riego (D)*. Caudal máximo que se extrae de cada hidrante, está directamente relacionado con el tiempo que el hidrante debe estar abierto durante el período de máxima demanda; viene dado por la expresión:

$$d = q \cdot S \cdot GL \quad \text{[Ec. 1.42]}$$

Siendo:

d:	dotación en l/s
q:	caudal ficticio continuo en l/s·ha
S:	superficie de la agrupación en ha
GL:	grado de libertad

Es posible calcular la dotación fijando el grado de libertad y conociendo el caudal ficticio continuo, o viceversa. Clément (1996) recomienda para el cálculo de redes de riego a la demanda, el valor mínimo del grado libertad debe ser 1,5 (con valores menores, la probabilidad de que la toma de riego se encuentre abierta es demasiado alta para ser aplicada en el modelo de Clément) y el máximo no debe exceder de 8. (Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino –Tarragona)

6. *Grado de libertad (GL)*. Es el coeficiente de seguridad del caudal que se proporciona al agricultor para objeto de riego, está representado con la ecuación:

$$GL = \frac{t}{t'} \quad \text{[Ec. 1.43]}$$

Siendo:

t:	número de horas disponibles para riego, generalmente el agua se encuentra a disposición del regante las 24 horas al día
t':	número de horas que el regante tendría abierta su toma por día, durante el período de máximo consumo del cultivo

7. *Presión de consigna.* Presión que se requiere en los emisores del tipo de riego a aplicar (aspersión, micro aspersión, goteo), adicionando las diferencia de cota entre el emisor más desfavorable y la cota del hidrante, más las máximas pérdidas de carga estimadas hasta el mencionado emisor.

8. *Unidad de riego.* Denominada también como agrupación de riego es aquella superficie cuyo valor es igual o superior al del límite inferior de la superficie básica de explotación en regadío de la zona de actuación, se encuentra alimentada por un hidrante (o varios de apertura simultánea) y su apertura es independiente del resto. La unidad de riego puede estar constituida por una sola finca o varias contiguas o próximas, que pueden pertenecer a uno o más propietarios, siempre que constituyan una sola unidad a efectos del diseño del riego.

9. *Garantía de suministro o calidad operacional (GS).* Es la probabilidad estadística de que los caudales circulantes por la red durante el período punta de consumo, no superen a los caudales de diseño; se expresa en porcentaje. La GS es variable en función del nivel de calidad que se otorgue al dimensionado de la red, sus valores adoptados con frecuencia se encuentran en el rango del 95 – 99 %.

Cuadro 5. Calidad operacional en redes de riego diseñadas a la demanda.

N° DE ACOMETIDAS (N)	GARANTÍA DE SUMINISTRO (GS)	CALIDAD OPERACIONAL (U)
<10	100	No se aplica Clément
10<N<50	99	2'33
50<N<100	95	1'65
>100	90	1'28

1.2.3. Principales criterios para diseñar un sistema de riego

Un sistema de riego debe cumplir con los objetivos de productividad que se logra a través de la optimización de la inversión y los gastos de funcionamiento. Para lograr este objetivo consideraremos los parámetros ambientales y de decisión que constan en figura16.

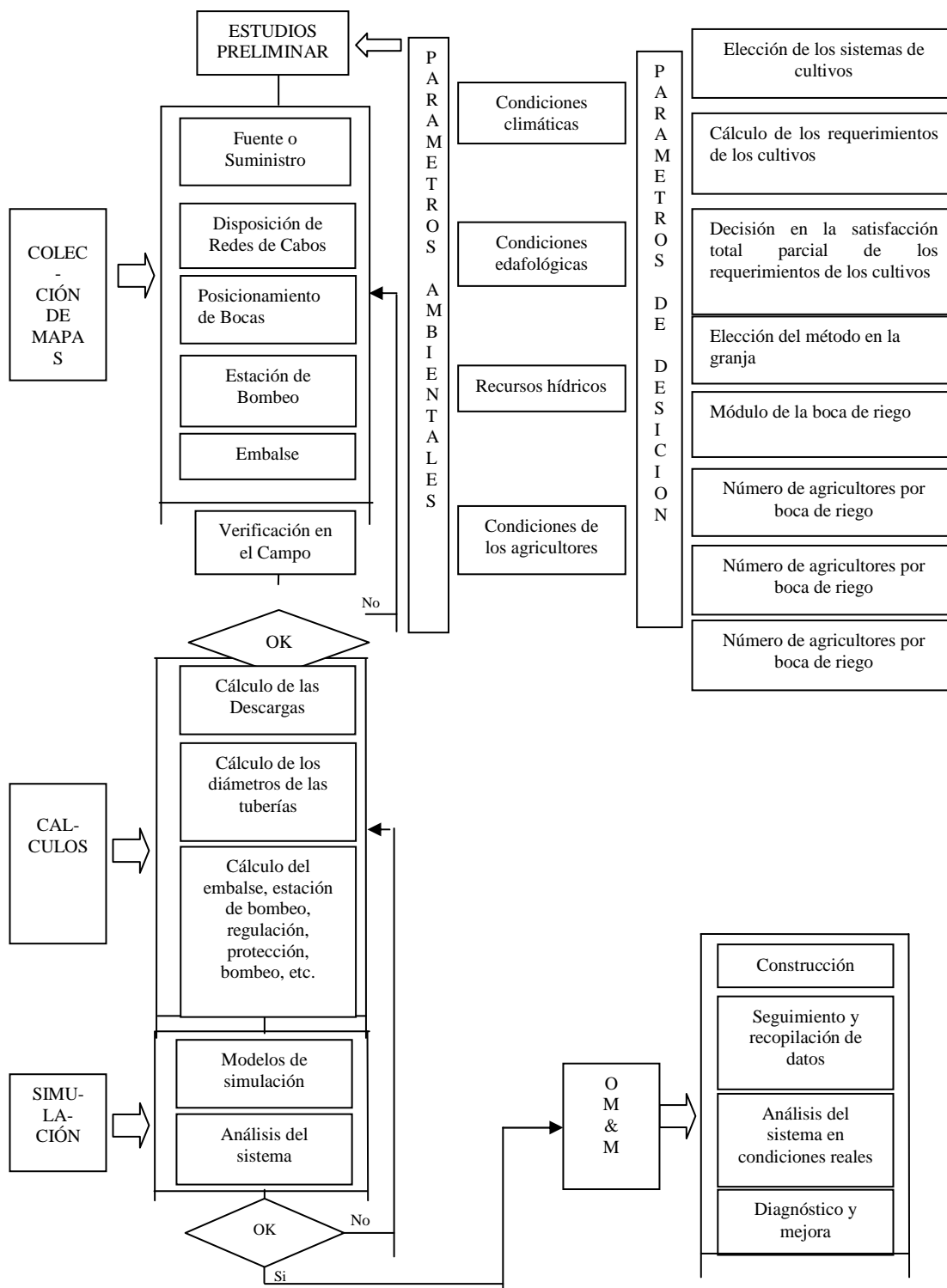


Figura 16. Principales etapas de un proyecto de riego (Lamaddalena y Sagardoy, 2000):

Los parámetros ambientales más importantes que no son sujetos de cambio y por lo tanto se consideran como datos de entrada para el diseño tenemos, (Lamaddalena y Sagardoy, 2000):

Las condiciones de clima y edafológicas.

Los datos de las condiciones climáticas y precipitación son importantes para la determinación de la evapotranspiración de referencia y para definir los tiempos de riego correspondientemente. La información sobre la edafología del distrito de riego nos permitirá conocer las características hidrodinámicas del suelo, y parámetros como la tasa de infiltración, la capacidad de campo, punto de marchitez permanente, etc. relacionados directamente con el riego.

Estructura de la agricultura y la tenencia de la tierra.

Tipo y posición de los recursos hídricos

Los recursos hidráulicos, constituyen el factor limitante para un sistema de riego debido que el volumen de agua disponible, es insuficiente en las épocas de mayor demanda generando la necesidad de contar con depósitos de almacenamiento para satisfacer estas necesidades, al considerar su ubicación se definirá el costo de transporte en grandes longitudes con pérdidas de carga elevadas.

Las condiciones socio económicas de los agricultores

Constituyen un elemento decisivo a la hora de seleccionar el método de riego y los plazos del mismo.

Patrón de cultivo

Los parámetros citados anteriormente, son de gran influencia en la elección del posible patrón de cultivo, conjuntamente con los factores que mencionamos a continuación:

- Las formas de cultivo.
- La satisfacción de las necesidades hídricas de los cultivos (parcial o totalmente).
- El método de riego parcelario.
- La densidad de los hidrantes.
- Descarga de hidrantes.
- Ofrecer programación.

En resumen, la determinación del patrón de cultivos se realizará tomando como base los datos del clima, las características del suelo y calidad del agua, las condiciones del mercado y el nivel técnico en que los agricultores se encuentran, en tanto que los requerimientos teóricos de agua del cultivo se deriva de los sistemas de cultivo y las condiciones climáticas.

Para el diseño de una red de riego a presión es indispensable contar con la topografía de la red, así como también del catastro en donde conste el número de parcelas, área y el nombre de los usuarios regantes que serán necesarios para la asignación del número y ubicación de la boca de riego.

Se considerará preliminarmente la ubicación de la captación o sistema de bombeo si es necesario, ubicación del embalse, equipo de protección y regulación que va de la mano de la definición del diseño de la red. Seguidamente realizaremos los cálculos de las demandas, determinación de caudales por línea, para finalmente decidir el dimensionado de la tubería.

AitKadi (1990) y Lamaddalena (1997) manifiestan que cuando el proceso de un sistema de riego se desarrolla como consta en la figura 17, “proceso de una sola vía”, se originan problemas de gestión que están relacionados con el diseño.



Figura 17. Proceso de desarrollo cronológico de un sistema de riego

Esto se debe a que el diseñador y el administrador no comparten iguales preocupaciones, por lo cual es conveniente analizar este proceso como un todo, en el cual las tres partes están afectadas entre sí, figura 18.



Figura 18. Proceso de desarrollo cronológico de un sistema de riego

En la última fase los modelos tienen una gran función que es la de simular diferentes escenarios y condiciones de funcionamiento del sistema; con lo cual analizaremos y gestionaremos efectivamente el sistema. Estos, podrán ser calibrados y validados una vez que se obtenga datos de campo de la operación de cada componente.

1.2.4. Fases del diseño

Las fases que se consideran para el diseño de una red colectiva de riego son:

a) Definición de la zona regable. Tenemos que considerar:

1. Punto de alimentación, tipo y características.
2. Superficie, planimetría y perfiles de la zona.
3. Características de los cultivos.
4. Condiciones de funcionamiento.
5. Disponibilidad de energía eléctrica, organización del consumo.
6. Sectorización que se ha previsto.

En esta etapa se establecerá el número de parcelas y unidades de riego. Se tomará de 20 – 30 m/ha o hasta 40 m/ha como longitud media de tuberías primarias y secundarias por ha de riego (Bonnal, 1983).

En lo que se refiere a las bocas de riego, García (1990) manifiesta que debe colocarse un promedio de un punto de entrega de agua entre cada 10-20 ha, pudiendo ser múltiple hasta 4 tomas; Bonnal hace referencia de colocar un promedio de una boca de agua entre cada 5-10 ha.

b) Información agroclimática. Para cumplir con el objetivo de la red de riego, es necesario abastecer los requerimientos hídricos de los cultivos, que estarán en función de:

1. Climatología de la zona.
2. Requerimientos del cultivo.
3. Edafología.
4. Sistema de riego empleado.

Es prioritario disponer de datos fiables de las condiciones climáticas y de esta manera calcular las necesidades hídricas de los cultivos. En muchos lugares de Europa se cuenta con información en red de estaciones agroclimáticas automáticas

que permiten conocer esta información; pero en el caso de países que no cuentan con esta tecnología y carecen de estaciones climáticas cercanas a la zona de estudio, los datos se obtendrán en forma aproximada mediante el software CROPWAT, creado por la FAO.

c) Sistema de riego adoptado. Con el objeto de cumplir con las consignas de presión y caudal es necesario conocer las características del tipo de riego que se desea implementar en área de cobertura. Así tenemos:

- Tipo de emisor que se usará (auto compensado o no)
- Tipo de conexión a los laterales (integrado o no)
- Valor del caudal del emisor.
- Valor de la presión de trabajo o el rango de presiones de funcionamiento.
- Número de emisores por planta.

Esta información será definida por el proyectista y por el agrónomo, y dependerá de los datos agroclimáticos, de las características del cultivo y del suelo, uniformidad y estrategias de riego (Arviza, 2007).

También se determinará las subunidades de riego, sus dimensiones y la ubicación de las tomas al inicio; factores determinantes en el dimensionamiento de las tuberías de cada subunidad. Al tratarse de redes colectivas será prioritario determinar el caudal por unidad de superficie, presiones mínimas de trabajo, y superficie total del distrito de riego.

d) Disponibilidad de energía eléctrica. Cuando sea necesario instalar un sistema de bombeo, es imperioso considerar una línea aérea hasta el cabezal. Así como el valor de las tarifas eléctricas (Arviza, 2007), por tanto debemos contar con:

- Tarifa eléctrica.
- Franjas horarias, en caso de haberlas.
- Funcionamiento previsto de la instalación en el año, que estará en directa dependencia del sistema de riego empleado y del diseño agronómico.

- e) Dotación, frecuencia y calidad. Es vital contar con una fuente de suministro que debe abastecer los requerimientos del sistema de riego en funcionamiento ideal.

Características de la red de riego.- Será necesario conocer datos como:

- Tipología de la red, puntos de alimentación.
- Sistema de alimentación.

Es necesario señalar que se debe prefijar la situación de funcionamiento de la red de riego, según las cuales quedarán definidas las condiciones de operación del sistema (Lara, 2007):

- Necesidades de caudal en las tomas de servicio: Constituye el volumen de agua necesario en el tiempo. Por lo tanto al diseñar una red de riego es necesario considerar que las necesidades punta se presenta en unos pocos días de ciertos meses del año.
- Presiones mínimas de servicio en los puntos de consumo: En este aspecto es conveniente considerar las necesidades de presión de dispositivos como aspersores, micro aspersores o goteros; y por supuesto se deberán sumar las diferentes pérdidas hasta la salida del agua; se toma como referencia una presión mínima en el hidrante de 2 - 4 kgf/cm². Por lo general se usan emisores con presiones máximas de 35 m, estimando 5 m como el valor máximo de pérdida de carga en la red terciaria de tuberías desde el hidrante hasta la salida del agua.(Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino – Tarragona)

- f) *Programación de riego.* Según manifiesta Pérez (1996), existen tres alternativas que las describiremos:

- Riego a la demanda. En la actualidad, existe la tendencia de dimensionar las redes colectivas de riego para que funcionen a la demanda. El agua está a disposición del agricultor durante la jornada de riego, así el caudal disponible es

mayor que el caudal ficticio continuo, esta programación tiene elasticidad de riego máxima.

- Riego por turnos. O demanda restringida, la flexibilidad de esta modalidad es nula, los usuarios disponen de un caudal asignado a la toma de riego en un horario fijo que se determina. Se pueden conseguir una distribución más uniforme de los caudales en toda la red.
- Riego mixto. Se realiza las labores de riego en las horas fijadas según el horario del turno en forma libre y luego completa el suministro de agua a través de tiempos muy cortos.

1.2.5. Diseño y dimensionamiento de la red

Para realizar el diseño y dimensionado de la red se desarrolla el siguiente proceso (González, 2010):

- Ubicación de los hidrantes.
- Trazado de la red.
- Determinación de caudales circulantes por las líneas de toda la red.
- Determinación de diámetros de tuberías.

Ubicación y descarga de hidrantes

Los hidrantes se colocan en forma usual al pie de una parcela o para suministrar agua a varias parcelas, con el objeto de realizar funciones de corte de suministro, regulación de presión, limitadores de caudal o medición.

El caudal de descarga de cada toma de agua será función del tamaño del área de riego del terreno y del requerimiento de agua; y por lo general es siempre mayor que el caudal continuo para facilitar al agricultor un cierto grado de libertad en el manejo del regadío.

La relación entre el caudal atribuido a cada hidrante y el caudal continuo es una medida del "grado de libertad" que un agricultor posee, para realizar la gestión de riego. El caudal máximo en los hidrantes puede ser ajustado por los reguladores de caudal, pero es usual adoptar un rango estándar de caudales, los cuales varían de un país a otro.

Las parcelas familiares con mano de obra limitada, bajas demandas de agua, parcelas pequeñas o dispersas, bajo nivel de inversión en equipo de riego, tienen un alto grado de libertad.

La colocación de un elevado número de hidrantes de riego eleva el costo de instalación no obstante permite una mejor operación, se debe colocar no menos de una boca de riego con un caudal de 5 l/s para un área de 2.5 ha con lo cual se facilitará el trabajo. En cuanto a la ubicación de estos elementos se los colocará en los límites de las parcelas cuando se trata de pequeñas parcelas, y en el centro en el caso de grandes áreas. (Lamaddalena y Sagardoy, 2000)

El diseñador deberá definir “calidad de operación” de acuerdo al nivel de garantía que se quiera otorgar a la red, se adopta por lo general $Pq= 95\%$ para $R > 50$, $Pq=99\%$ para $10 < R \leq 50$ y $Pq= 100\%$ cuando se trata de que todos los hidrantes se encuentren abiertos para $R \leq 10$ (Lamaddalena y Sagardoy, 2000).

Trazado de la red

En diversa literatura como IRYDA (1985) y Granados (1990) se pueden encontrar diversas técnicas de trazado de redes arborescentes que articulan una serie de nodos, (en esta ocasión de hidrantes) mediante criterios de mínima longitud, ángulos de bifurcación adecuados, incluso procedimientos conjuntos de optimización del trazado y diámetros; los cuales constituyen en su mayor parte ejercicios teóricos debido a las limitaciones, hipótesis y restricciones empleadas en los propios métodos. Un trazado de menor longitud no siempre supone el menor coste, es necesario considerar los diámetros necesarios.

Es conveniente realizar el trazado, por los lugares donde es posible el acceso de maquinaria, acopio, y almacenamiento de materiales, disponibilidad para reparaciones y mantenimiento; esto es a lo largo de caminos y vías públicas, buscando la afección mínima a la parcela.

Aliod et al. (2010) consideran que es muy conveniente considerar una serie de criterios generales en la obtención de bifurcaciones y cambios de dirección:

- Las bifurcaciones se realizarán con ángulos menores de 90° (y si es posible, menores de 45°) respecto a la dirección de alimentación, para evitar pérdidas de carga, vibraciones, erosiones.
- Prever radios de curvatura amplios en los cambios de dirección del trazado, acordes con el material y diámetro empleado, de manera que si es posible, se puedan encajar mediante dos alineamientos admisibles de las juntas de los tramos de tubería (las conducciones de PE en este sentido permiten gran flexibilidad), evitando cuando sea posible piezas especiales como codos.
- Cuando se utilicen piezas especiales para cambios de dirección, se las dotará del mayor radio de curvatura evitando cambios abruptos de dirección por unión en ángulo vivo de tramos de tuberías.

Determinación de caudales circulantes por las líneas de toda la red

Para determinar las descargas en las líneas que conforman la red se puede adoptar dos procedimientos: a la demanda y por turnos

a) A la demanda

Lamaddalena y Sagardoy (2000) declaran que el disponer de **agua a la demanda** facilita a los usuarios las labores agrícolas del sistema de riego dando mayor flexibilidad.

El riego funcionando a la demanda es muy generalizado en sistemas presurizados, para lo cual es necesario, una serie de condiciones previas que garantizan esta función:

- Tarifa de agua adecuada, basada en el volumen efectivamente usado por los agricultores, de preferencia con las tasas de aumento de los volúmenes de agua.
- Los dispositivos de entrega (hidrantes) tienen que estar equipados con un medidor de flujo como limitador, control de presión y válvula de compuerta.
- El diseño tiene que ser adecuado para el transporte de la alta demanda durante el período pico para garantizar la presión mínima en las bocas de riego y de esta manera llevar a cabo el riego en las explotaciones agrícolas de una manera adecuada.

El criterio prioritario de desempeño debe ser el de funcionar satisfactoriamente en una amplia gama de escenarios de demanda posible, en donde los modelos de análisis pueden ayudar a los gerentes a entender por qué y dónde se producen los fallos; con lo cual la rehabilitación y modernización de los sistemas se realizará de manera adecuada.

Debido a la implementación a gran escala de los sistemas de riego a la demanda, en los años 1960 en Francia se promovió el desarrollo de modelos estadísticos para calcular los flujos de diseño.

Primer modelo de Clément

En los sistemas funcionando bajo demanda, la descarga nominal que se selecciona en los hidrantes (d) es más elevada de la que debería derivarse de forma continua:

$$\mathbf{D = q_s \cdot A} \qquad \qquad \qquad \mathbf{[Ec. 1.44]}$$

Siendo:

- D: gasto basado en el requerimiento máximo de agua en un período de 24 horas al día (l/s)
- q_s : caudal ficticio continuo (l/s/ha)
- A: área de la parcela regada por hidrante. (ha)

El método probabilístico propuesto por Clément supone:

- a) Que cada hidrante (d) tiene una cierta probabilidad de apertura, (p) constante en el periodo de riego considerado,
- (b) p es independiente de la probabilidad de apertura de cualquier otro hidrante j . En consecuencia, el evento aleatorio “caudal circulante por una conducción” en función del número de hidrantes abiertos aguas abajo, conforma una variable aleatoria de tipo binomial.

$$\mathbf{t' = \left(\frac{q_s \cdot A \cdot T}{R} \right) / d} \qquad \qquad \qquad \mathbf{[Ec. 1.45]}$$

Siendo:

- q_s .- descarga específica continua, 24 horas al día (l/s/ha)

- A.- área bajo riego (ha)
- R.- número total de bocas de riego.
- d.: descarga nominal de cada hidrante (l/s)
- T: duración del periodo pico (h)
- T': tiempo de operación promedio de cada hidrante en tiempo pico (h)
- r: coeficiente de uso de la red (definido por la relación T'/T)
- t': tiempo de operación promedio por hidrante durante periodo pico (h)

La probabilidad elemental, p, de la operación o que cada hidrante funcione se define como

$$p = \frac{t'}{T} = \frac{t'}{r \cdot T} = \frac{q_s \cdot A \cdot T}{R \cdot d \cdot r \cdot T} \quad [Ec. 1.46]$$

Entonces

$$p = \frac{q_s \cdot A}{r \cdot R \cdot d} \quad [Ec. 1.47]$$

Por lo tanto, para una población de hidrantes homogénea R, la probabilidad de encontrar una boca de riego abierta es p, mientras que (1 - p) es la probabilidad de encontrarlo cerrado.

El número de hidrantes en funcionamiento se considera una variable aleatoria que tiene una distribución binomial con media:

$$\mu = Rp \quad [Ec. 1.48]$$

y varianza

$$\sigma^2 = Rp(1 - p) \quad [Ec. 1.54]$$

Por lo tanto, la probabilidad acumulada P_q de que entre los hidrantes R, exista un máximo de hidrantes N funcionamiento al mismo tiempo es:

$$P_q = \sum_{k=0}^N C_R^k \cdot p^k \cdot (1 - p)^{(R-k)} \quad [Ec. 1.49]$$

Siendo:

$$C_R^k = \frac{R!}{k! (R - k)!} \quad [Ec. 1.50]$$

El número de combinaciones de los hidrantes R en un tiempo K.

Cuando R es suficientemente grande ($R > 10$) y $p > 0.2-0.3$, la distribución binomial se aproxima a la distribución normal de Laplace-Gauss cuya probabilidad acumulada (P_q) para obtener un máximo de x bocas de riego funcionando al mismo tiempo (con $-\infty < x < N$) es la siguiente:

$$P_q = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{U(P_q)} e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad [Ec. 1.51]$$

Donde U (P_q) es la variable normal estandarizada que corresponde a la probabilidad de P_q , y u es la desviación normal estándar dada por:

$$u = \frac{x - Rp}{\sqrt{Rp(1-p)}} \quad [Ec. 1.52]$$

La integral [Ec. 1.51] se resuelve con el desarrollo en serie de la función exponencial $e^{-\frac{u^2}{2}}$. Las soluciones de esta integral se encuentran en el cuadro 6 y de acuerdo a un valor prefijado P_q , es posible calcular el número de hidrantes (N) que operan simultáneamente.

$$N = Rp + U(P_q) \sqrt{Rp(1-p)} \quad [Ec. 1.53]$$

Cuando se consideran hidrantes con la misma descarga, la descarga total de aguas abajo en una sección genérica k viene dada por:

$$q_k = \sum_i Rp d_i + U(P_q) \sqrt{\sum_i Rp(1-p)d_i^2} \quad [Ec. 1.54]$$

Y, para diversas descargas de diferentes bocas de riego (d_i), donde i es el número que clasifica al hidrante tenemos:

$$q_k = \sum_i p_i d_i + U(P_q) \sqrt{\sum_i p_i(1-p_i)d_i^2} \quad [Ec. 1.55]$$

Cuadro 6. Función Estándar Normal de Distribución Acumulativa.

P_q	$U(P_q)$
0.90	1.285
0.91	1.345
0.91	1.405
0.93	1.475
0.94	1.555

0'95	1'645
0'96	1'755
0'97	1'885
0'98	2'055
0'99	2'324

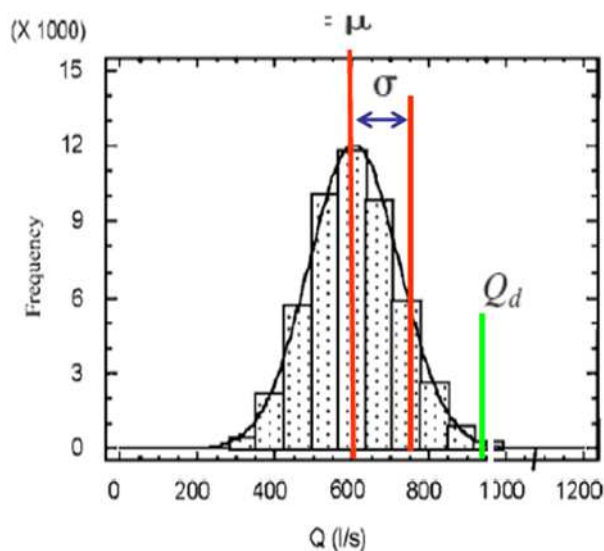


Figura 19. Aproximación según la distribución Normal (Aliod, 2010)

Determinación del caudal ficticio continuo (q_s)

El caudal ficticio continuo (q_s) es el flujo por hectárea de terreno que debería suministrarse en forma continua durante el tiempo de riego, el mismo que está referido al período punta de consumo de la campaña de riego y a los valores medios de la alternativa de cultivos prevista.

Con el fin de aplicar el primer modelo de Clément, es necesario determinar este valor en (l/s/ha) en la red aguas abajo de la sección en los casos siguientes:

- Cuando los patrones de cultivo son idénticos en toda la zona, el caudal ficticio continuo es estimado según el peso proporcionado a cada uno de los cultivos del distrito de riego, que es válido para cada parcela y para todas las líneas de la red.
- En el caso de que la intensidad de cultivo es similar en toda la zona de riego, la relación entre el área neta de riego y la superficie total, también es válida para cada parcela y para todas las partes de la red en estudio.

Existe una serie de paquetes de computación que se encuentran disponibles para obtener este valor (CROPWAT, ISAREG, etc.), así como una extensa bibliografía.

b) *Por turnos*

Cuando se programa el riego con la modalidad de **turnos**, la flexibilidad será nula y los usuarios deberán tener asignado su caudal en un horario fijo.

El volumen de agua asignado a una unidad de superficie se expresa por un caudal teóricamente constante durante toda la jornada de riego; el mismo que se asigna según la duración, permitiendo de esta manera usar el tiempo como una unidad de medida efectiva para irrigar.

Para realizar el diseño de la red por la modalidad de turnos necesitamos también obtener caudales por líneas o por nudos, necesidades de caudal en los hidrantes, número de hidrantes, áreas a regar. Además debemos contar con la topología y topografía de la red.

Se diferencia las situaciones siguientes en cuanto a la duración de riego:

Duración de la entrega con un tiempo fijo predefinido. Este es el caso de sistemas de riego donde el derecho al agua está expresado en un tiempo preestablecido, el cual limita la duración de la entrega de agua al usuario.

Duración de la entrega con un tiempo variable. Este es el caso de sistemas de riego donde el derecho al agua está expresado como el derecho a “terminar de regar” la parcela cultivada o una superficie pre-establecida, por esta razón la entrega de agua no tiene un tiempo definido a nivel del usuario, podrá variar según el tipo de riego, suelo, humedad existente en el suelo, estado de desarrollo del cultivo y superficie cultivada principalmente. (Apollin et al. 1998)

En la mayoría de sistemas de riego se ha observado que la duración de la entrega de agua a nivel de la unidad de reparto está claramente definida y no presenta variaciones. Es posible encontrar que la duración de la entrega de agua puede variar de un ciclo de entrega a otro.

Cuando se trata de automatizar, el sistema de riego usando la modalidad por turnos a diferencia del sistema de riego a la demanda, el control de apertura y cierre de los

hidrantes, y la secuencia de funcionamiento de los pertenecientes a un mismo turno, se incluirían en la programación de las diferentes unidades concentradoras y no supondría un aumento en el presupuesto de automatización de la red.

Este tipo de riego es necesario implementar cuando en el distrito de riego existe poca presión a ciertas horas por exceso de demanda, el problema es tan grave por tanto es necesario restringir el tiempo de riego para que sea posible abastecer a todos los nudos de demanda (Tarjuelo, 2000).

Lara (2007) considera que los diseños que se realizan partiendo de las hipótesis de Clément resultan económicamente más elevadas que cuando el diseño se lo realiza usando la hipótesis de riego por turnos.

Determinación de diámetros de tuberías

Consiste en el dimensionado de la red y es la última etapa del proceso de diseño, en este apartado se obtiene el diámetro de cada una de las líneas que conforman la red, para lo cual se han desarrollado diferentes metodologías de las que hablaremos en capítulos posteriores.

1.2.6. Métodos de riego

Se entiende por método a la forma en que se aplica el agua al suelo para que sea utilizada por la planta. Los métodos más comúnmente utilizados se clasifican como riego superficial o por gravedad y riego a presión.

La selección del método de riego dependerá de criterios que tienen relación con el cultivo, suelo, topografía, economía, clima, disponibilidad de mano de obra, así como labores vinculadas con el desarrollo físico, manejo del riego y administración general del predio; e implica al mismo tiempo tomar decisiones respecto al planeamiento integral del predio y grado de sistematización del terreno.

El riego a presión requiere carga de presión para funcionar, que se la obtiene por diferencia de cota entre la fuente de agua y el sector de riego, o por un equipo de bombeo. Se

caracteriza por que la aplicación del agua se la realiza a través de emisores (aspersores, microaspersores, goteros, cintas de exudación).

1.2.7. Componentes de un sistema de riego presurizado

Un equipo de riego presurizado está formado por los siguientes elementos: cabezal de riego, red de conducción y distribución y emisores.

En la figura 20 se muestra esquemáticamente la disposición dentro de un predio o granja de los diferentes componentes de un riego presurizado.

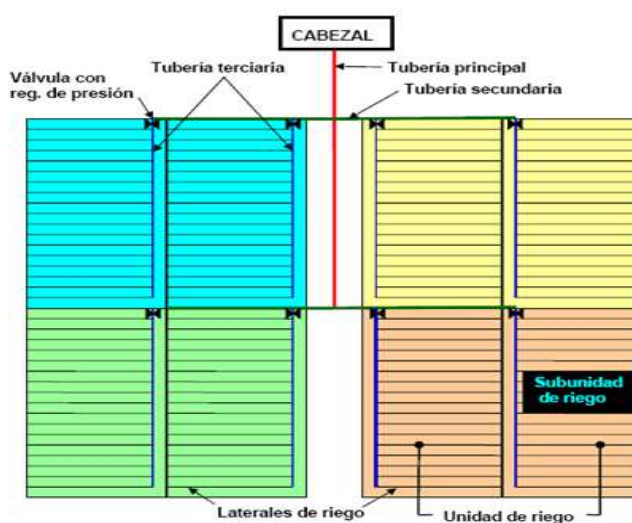


Figura 20. Esquema de un sistema de riego presurizado (Liotta M., s/f)

La subunidad de riego es el área que se riega con una válvula o cabezal de riego, la unidad de riego es la superficie que se riega en forma simultánea tomando un conjunto de subunidades de riego y operación de riego es la superficie que se riega a la vez en el conjunto de unidades de riego (Liotta M., s/f)

Cabezal

El *cabezal* de un equipo de riego presurizado está compuesto principalmente por cuatro elementos (Tapia et al. 1999):

- a) Fuente de abastecimiento

Es el principal componente de un sistema de riego presurizado, otorga presión y caudal de agua suficiente al sistema; situación que debe estar en función de las necesidades que demanda una instalación en particular.

Cundo sea necesario se deberá colocar equipos de bombeo que vienen especificados en catálogos editados por los fabricantes, donde se relaciona el caudal con la presión y la potencia requerida para diferentes diámetros de rodete o impulsor y distintos niveles de eficiencia de funcionamiento del grupo motobomba.

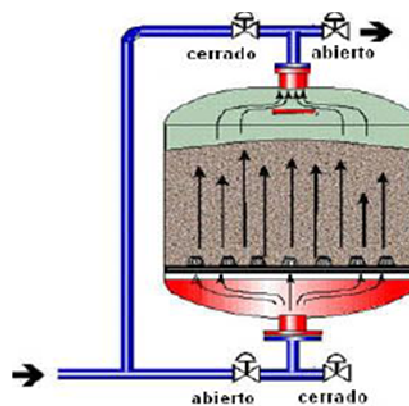
b) Unidad de filtraje

Corresponde a una unidad que es clave y de vital importancia en el cabezal, dado que su acción impide el taponamiento u obturación de los emisores, evita la entrada de materia orgánica, partículas mineras en suspensión, etc. Se deben tomar precauciones desde el ingreso del agua al reservorio como la construcción de rejillas y decantadores, realizar el pre filtrado en la succión.

Los filtros más usados son: hidrociclones, filtro de grava y los filtros de malla y anillas



a)



b)

Figura 21. a) Conjunto de hidrociclones. b) Filtro de grava en retro lavado (Liotta M.)

c) Unidad de fertilización

Se emplea para inyectar al sistema fertilizantes y ácidos, consta de dos partes: los depósitos de almacenamiento que son tanques que resisten a la corrosión, su tamaño está en función de las necesidades del sistema; y la inyección o fertilización que se realiza por

diferentes dispositivos como tanque de fertilización, venturi, bombas de inyección para incorporar soluciones al sistema. (Liotta M., s/f)

d) Elementos de control y medición

Los elementos electrónicos permiten automatizar el funcionamiento y operación de la red en distintos sectores. Entre los elementos de regulación y control de flujo están las válvulas de distinto tipo: de paso, reguladores de presión, de retención (check), hidráulicos, electrónicos, volumétricos, etc. Su operación directa o indirecta se realiza mediante programadores que regulan el comportamiento del flujo y la presión en la red.

Redes de conducción y distribución

Las tuberías que se utilizan en las instalaciones de riego presurizado son fundamentalmente de policloruro de vinilo PVC y de polietileno PE y últimamente, polipropileno y polibutileno. En grandes instalaciones se recurre al fibrocemento para la red principal y en ocasiones para tramos muy cortos, se utiliza el hierro galvanizado, aunque éste debe evitarse siempre que sea posible por su fácil corrosión.

De estos materiales, el fibrocemento es el más económico para grandes diámetros de tubería, particularmente diámetros mayores a 150-200 mm, debido a que es un material más pesado, sin embargo la conexión de los distintos tramos resulta más laboriosa que cuando se trabaja con PVC y PE.

El PVC es rígido y más barato que el polietileno para diámetros de 50 mm y superiores; por último el PE es flexible y resulta ser el material más económico para diámetros inferiores a 50 mm, por lo que se utiliza siempre en la red terciaria y ramales de riego.

En definitiva, el conjunto de tuberías deben ser capaces de conducir el agua con la mayor eficiencia posible desde la fuente de abastecimiento hasta los nudos de demanda, de aquí se clasifican en: (Tapia et al. 1999)

Cuadro 7. Descripción de tipos de líneas en una sistema de riego

Elemento	Descripción
-----------------	--------------------

Matriz o línea principal	Tubería de mayor diámetro en la red, su función es conducir el agua hasta la derivación de los diferentes sectores, generalmente van instaladas bajo tierra.
Submatrices o líneas secundarias	Tuberías de menor diámetro que la matriz o línea principal y son las encargadas de llevar el agua desde ésta al sector correspondiente.
Terciarlas o múltiples	Distribuyen el agua hacia las líneas con emisores. Son generalmente de PVC y de diámetro más pequeño que las submatrices, generalmente también van instaladas bajo tierra.
Líneas porta goteros o laterales	En estas tuberías se insertan los goteros, son de polietileno y por lo general de 16 o 12 mm de diámetro, van sobre la superficie en la hilera de cultivo.

Emisores

Los emisores son dispositivos que controlan la salida de agua desde las tuberías laterales.

Según el caudal que arrojan se dividen:

- Emisores de bajo caudal, inferior a 16 l/h, comprenden los goteros y las tuberías emisoras o cintas.
- Emisores de alto caudal, proporcional caudales comprendidos entre 16 y 200 l/h, aquí se encuentran los difusores y los microaspersores.

Las características necesarias que deberán reunir los emisores son:

- Fácil instalación.
- Poco sensible a la obstrucción.
- Poco sensible a las variaciones de presión.
- Bajo coste.
- Mantener sus características a lo largo del tiempo.

No es necesario que el emisor posea a la vez todas estas características, sino sólo aquellas que se precisan para cada caso concreto.

Los emisores de bajo caudal suelen trabajar a una presión próxima a los 10 m.c.a., mientras que los de alto caudal suelen hacerlo a 20 m.c.a. Las cintas de exudación trabajan aproximadamente en un rango entre 1 y 3 m.c.a.

Curva características del emisor. Relación caudal-presión

En cualquier emisor (con excepción de las cintas de exudación), el caudal de descarga y la presión de servicio se relacionan mediante la ecuación:

$$q = kH^x \quad [Ec. 1.56]$$

Siendo:

- q: caudal del emisor, en l/h.
- k: coeficiente característico de cada emisor, que equivale al caudal que proporcionaría a una presión de 1 m.c.a.
- H: presión a la entrada del emisor, en m.c.a.
- x: exponente de descarga característico de cada emisor

Representado en el eje de abscisas los valores de las presiones y caudales en el eje de ordenadas, obtenemos la característica del emisor que se definirá para una condición de temperatura. (Salas et al. 2007)

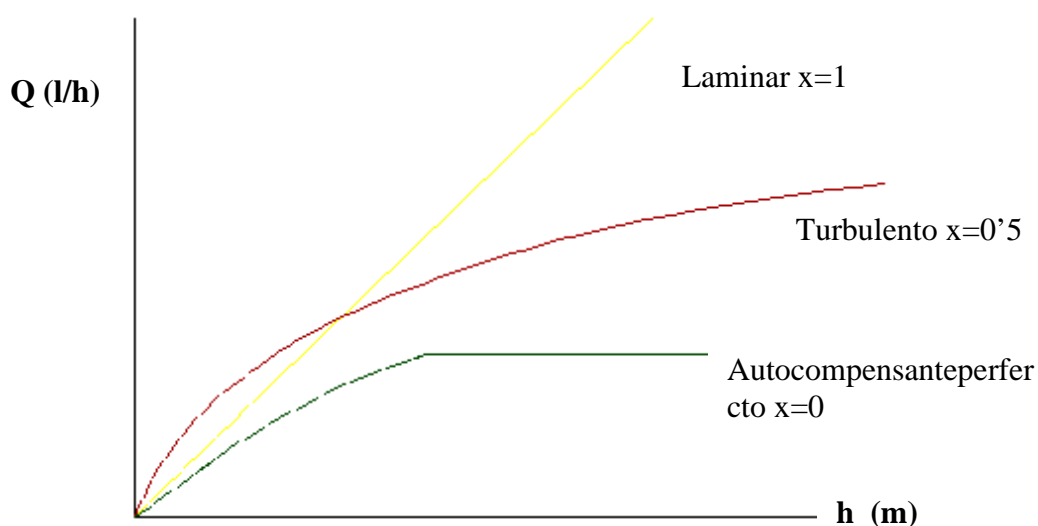


Figura 22. Curva característica de emisores: (Salas et al. 2007)

El exponente de descarga expresa la sensibilidad de un emisor a las variaciones de presión, su valor oscila entre cero a uno. Cuando se aproxima a cero significa que el caudal varía muy poco con las variaciones de presión, en cuyo caso el emisor se llama autocompensante perfecto ($x=0$), la curva se convierte en una recta; en el caso de que su valor se aproxima a la unidad el caudal varía mucho con las fluctuaciones de presión entonces tenemos un régimen laminar ($x=1$), y cuando se trata de emisores de tipo orificio o tobera ($x=0,5$).

Uniformidad de fabricación

Teóricamente todos los emisores de una misma marca y modelo deberían proporcionar similar valor de caudal cuando actúan a igual valor de presión y temperatura, pero en la práctica no ocurre esto. Las variables de fabricación (tipo de materia, temperatura, desgaste de la maquinaria, etc.) afectan a las dimensiones del emisor y, por tanto, a su caudal. Para estimar la uniformidad de una muestra de emisores se ha establecido el coeficiente de variación de fabricación (CV), según el cual se establecen dos categorías de emisores:

Categoría A. Coeficiente de variación inferior a 0'05.

Categoría B. Coeficiente de variación comprendido entre 0'05 y 0'1.

Los emisores de categoría A proporcionan una desviación pequeña con respecto al caudal nominal, mientras los de categoría B suministran una desviación considerable, por lo que se elegirá los de categoría A, para obtener buena uniformidad de distribución del agua.

Sensibilidad a las obstrucciones

La sensibilidad a las obstrucciones dependerá de las características del emisor (mínimo diámetro de paso, recorrido más o menos sinuoso del agua y velocidad de circulación del agua dentro del emisor), de la calidad del agua y de las condiciones de filtrado.

Según el mínimo diámetro de paso de los emisores se establece la siguiente clasificación:

Cuadro 8. Grado de sensibilidad de obturación de los emisores

Diámetro mínimo (mm)	Sensibilidad
Gotos y Tuberías Emisoras	
$\leq 0'7$	Alta
0'7-1'5	Media
$\geq 1'5$	Baja
Difusores y micro aspersores	
$\leq 0'4$	Alta
0'4 – 0'7	Media
$\geq 0'7$	Baja

El riesgo de obstrucciones disminuye a medida que aumenta la velocidad, por tanto es preferible el régimen turbulento al laminar.

Cuando el emisor tenga una baja sensibilidad a las obstrucciones, éstas pueden originarse debido a un filtrado inadecuado o por un incorrecto manejo de la instalación.

Sensibilidad a los cambios de temperatura

Los emisores que trabajan en régimen laminar son muy sensibles a las variaciones de temperatura, ya que al aumentar ésta se incrementa el caudal, lo que origina una disminución de la eficiencia de riego o de la uniformidad en la distribución del agua en aquellas instalaciones en donde se riega a diferentes horas del día, lo que no ocurre en emisores de régimen turbulento y autocompensantes.

Las variaciones de temperatura además, ocasionan envejecimiento acelerado del material, que en el caso de los emisores autocompensantes producen pérdida en su mecanismo de funcionamiento.

Clasificación de emisores

Gotos

Existe una gran variedad de goteros de diversas formas y configuración para disipar la presión. Por lo general se usan los que operan con caudales entre 1 a 4 l/h, contando con la siguiente clasificación:

- a) De laberinto. Son de largo conducto (de hasta 2 m de longitud) de pequeño diámetro de 0'5 a 5 mm, en donde el flujo de agua recorre en forma tortuosa y pierde presión, son de régimen turbulento, poco sensible a la temperatura y a las obstrucciones, su coeficiente de fabricación (C.V.) puede ser bastante bueno (0'02 a 0'05)
- b) Tipo Vortex (de botón). Estos goteros tienen una cámara circular en donde se produce un flujo vorticial, el flujo ingresa a una pequeña cámara en forma tangencial originando un movimiento en espiral que ocasiona una pérdida de carga y luego sale al exterior en forma de gota. El coeficiente de fabricación en general es bajo ($CV=0'04$), son muy sensibles a las obturaciones debido a que los modelos existentes en el mercado tienen un diámetro de paso del orden de 0'6 mm (figura 23). También encontramos en el mercado goteros de botón desarmable que permiten la limpieza en las obturaciones (Liotta M.).



a) b)
Figura 23. a) Gotero de laberinto. b) Goteros tipo vortex (de botón) (Liotta M.)

- c) Autocompensantes. Poseen regulación de presión, tienen la singularidad de mantener el mismo caudal aunque varíe la presión. El flujo es turbulento y en su interior tienen un diafragma que se deforma por la diferencia de presión del agua antes y después de la misma, modificando el conducto de paso y manteniendo el caudal constante. Los límites inferior y superior de presión de funcionamiento están entre 10 m.c.a. y (30-40) m.c.a. respectivamente.



Figura 24. Gotero auto compensado (Liotta M.)

- d) No auto compensado. Carecen de mecanismo de regulación de caudal, el mismo que varía en función de la presión. Funcionan con menor presión que los goteros auto compensados y son más económicos, pero se debe tener la precaución de tomar longitudes de laterales menores, para no perder uniformidad de caudal (+-10)
- e) Auto limpiante. Se clasificarse en dos tipos; aquellos que pueden estar o no en posición limpiante y los que continuamente lo están. Los primeros sólo se limpian durante el corto tiempo que tarda el sistema en ponerse en funcionamiento a la presión de régimen. Se preverá que la capacidad de sistema en caudal sea suficiente para llegar a la presión de régimen, ya que descargan más caudal cuando están en la posición de limpieza.

Cintas o tuberías perforadas

Suministran un caudal continuo a lo largo de su recorrido, por lo que en sus características no se define un caudal por cada salida, sino un caudal por metro lineal de tubería. Poseen emisores normalmente espaciado entre 0'20 a 0'60 m, trabajan con presiones inferiores a 10 m (1 kg/cm^2), el grosor de la cinta puede ser de (0'1-0'2) mm y en su interior tienen circuitos en forma de laberinto que constituyen el gotero con salida al exterior.

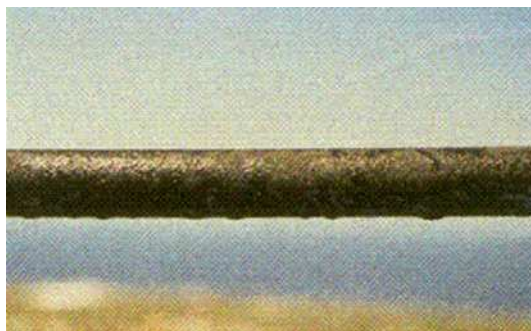


Figura 25.Cinta de exudación (Salas et al. 2007)

Los orificios de salida del agua son pequeños, siendo necesaria la utilización simultánea de filtros de arena y malla para evitar obstrucciones. El material que se usa en su fabricación suele ser polibutileno. Se utilizan tanto extendidas sobre el terreno como enterradas.

Difusores

Proyectan el agua en forma de lluvia fina y desde 30 cm de la superficie del suelo a través del aire a una distancia de 1 a 2'5 m, mojando una superficie de 2 a 5 m de diámetro. Los caudales de funcionamiento se encuentran en el orden de 25 a 120 l/h.

Principalmente existen dos tipos:

Microaspersores. Poseen una bailarina giratoria donde el chorro va rotando, son del mismo material que los microjets, pero compuestos de dos piezas, una base y una cabeza. En la base está el orificio de salida del agua y la cabeza la distribuye en áreas de 180°y 360°.

Microjets. Emiten el agua en forma de rayos (jets) sin rota, estático (no tiene partes móviles). Básicamente son boquillas compuestas de una sola pieza de polímero, sujeta a un soporte que la eleva a una altura de 10 a 20 cm. sobre el suelo.

Los difusores pueden mojar por sectores de círculo de: 280°, 270°, 180°, 90°, 40°, etc. lo que resulta de gran utilidad.

1.2.8. Riego localizado

Radica en aplicar el agua a una zona más o menos restringida del volumen de suelo que habitualmente ocupan las raíces, siendo sus principales características:

- No moja la totalidad del suelo.
- Se utilizan pequeños caudales a baja presión.
- El agua se aplica con alta frecuencia.

Con la aplicación de este tipo de riego se modifican algunas características de las relaciones suelo-agua-planta, tales como: reducción de la evaporación, distribución del sistema radical, régimen de salinidad, etc. Debido a la alta frecuencia de aplicación del agua y al encontrarse el suelo a capacidad de campo o muy próximo a ella las plantas absorben el agua con mucha facilidad (Salas et al. 2007)

El riego localizado incluye:

Riego por goteo. Los dispositivos aplican el agua gota a gota o mediante flujo continuo, con un caudal inferior a 16 litros/hora por punto de emisión o por metro lineal de manguera de goteo.

Riego por micro aspersión. Los dispositivos arrojan el agua en forma de lluvia fina, con caudales comprendidos entre 16 y 200 l/h por punto de emisión.

Elementos de un sistema de riego localizado

El flujo de agua ingresará en el sistema con la suficiente presión para el correcto funcionamiento de la instalación, entra al cabezal de riego que estará dotado por filtros, luego pasará a la red de distribución donde es distribuida con tuberías y accesorios a las diversas unidades y subunidades a regar, finalmente sale por los emisores de riego. Con el objeto de garantizar un riego adecuado, se instalarán elementos de medida, control y protección en el sistema.

En la figura se observa los elementos de un sistema de riego localizado

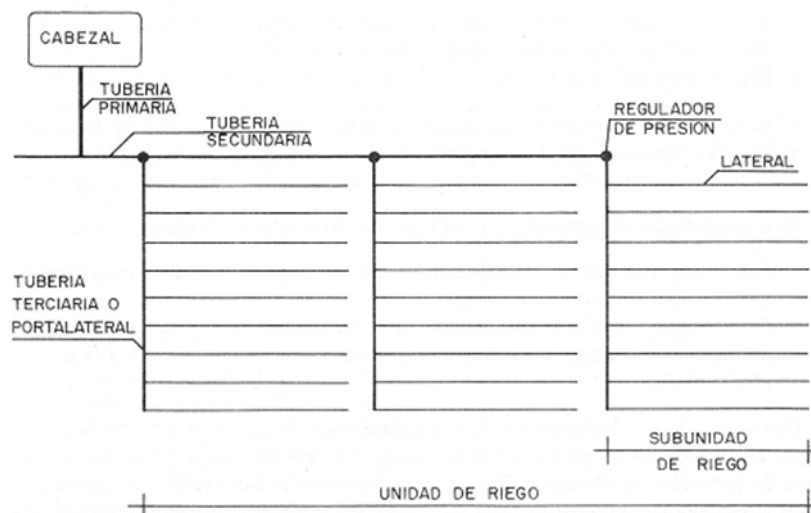
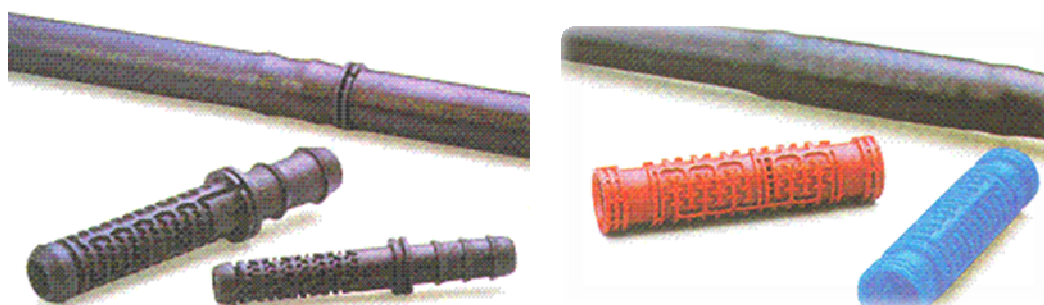


Figura 26. Red de distribución de una instalación de riego localizado (Salas et al. 2007)

Conexión del gotero

La conexión del gotero a la tubería puede realizarse por medio de:

- Interlínea. Se instala entre dos secciones transversales de la tubería lateral. Cuando el gotero se conecta a tubería de polietileno, el máximo incremento de diámetro ocasionado en la tubería como consecuencia de la instalación del gotero debe ser del 13 %. En el caso de los sistemas integrados están formados por goteros convencionales incorporados al interior de la tubería en el proceso de fabricación, con una separación entre ellos de 30-80 cm, lo que permite al sistema regar cultivos en línea.



a) b)

Figura 27. Conexión de goteros: a) Goteros interlínea. b) Goteros integrados (Salas et al. 2007)

- En derivación o sobre línea. Se instala sobre la pared de la tubería lateral mediante un orificio. El fabricante debe suministrar la herramienta adecuada para asegurar la estanquidad de la conexión con cada tipo de gotero



Figura 28. Conexión de goteros integrados (Liotta M.)

La elección de un gotero adecuado influye decisivamente, tanto en la garantía de un buen funcionamiento de la instalación, como en la vida útil, lo que repercute en los costes de amortización. El fabricante debe suministrar al usuario los siguientes datos:

- Marca registrada o nombre del fabricante.
- Caudal nominal y presión de funcionamiento.
- Categoría del emisor (A ó B).
- Instrucciones para la conexión a la tubería.
- Tipo de tubería aconsejable y sus medidas.
- Dimensión mínima de paso del agua.
- Curva caudal-presión.
- Ecuación del emisor.
- Intervalo de presiones de funcionamiento.
- Intervalo de autocompensación (en caso de emisores autocompensantes).
- Instrucciones para la limpieza.
- Limitaciones de uso (fertilizantes, productos químicos).

- Longitud equivalente de la pérdida de carga originada por la conexión del emisor a la tubería. (en metros de tubería)

En caso de no suministrar datos de longitud equivalente, como norma general se puede tomar los siguientes valores

- Conexión interlínea. La longitud equivalente de cada gotero varía entre 0'1 y 0'3 m; un valor común en tuberías porta goteros con conexión interlínea de diámetros nominales de 16 mm es de 0'23 m/gotero.
- Conexión en derivación. La longitud equivalente de cada gotero depende del diámetro de la tubería en donde está conectado.

Cuadro9. Pérdidas de carga en longitud equivalente que originan los goteros interlínea.

Diámetro Nominal (mm)	12	16	20	25	32	40	50	63
Longitud Equivalente(m)	0'25	0'16	0'12	0'08	0'06	0'05	0'04	0'03

Evaluación de la uniformidad de distribución del agua de riego

A la hora de realizar las actividades de riego localizado es importante, aplicar de manera uniforme el agua y demás productos que se requieran incorporar a los cultivos. Así, hablamos de baja uniformidad cuando existe exceso o déficit en la aplicación de agua, mal reparto de abonos; lo que producirá alteración del desarrollo del cultivo y por tanto de la producción.

Para realizar la evaluación de la uniformidad de aplicación, es necesario elegir una unidad y subunidad de riego representativas de la instalación de riego localizado. Si se cree conveniente se considerará también la unidad que presente las condiciones más desfavorables, es decir, la unidad más alejada o cercana al cabezal de riego según la pendiente, con los laterales o tuberías terciarias más largas y con pendientes mayores. En primer lugar se determinará el coeficiente de uniformidad de la subunidad elegida y posteriormente el de la unidad de riego.

Uniformidad de la subunidad de riego

Para evaluar la uniformidad de riego se utilizan los coeficientes de uniformidad de caudales (Cuc) y uniformidad de presiones (Cup). Para el cálculo del *coeficiente de uniformidad de caudales* (Cuc) se elegirá un número determinado de emisores distribuidos uniformemente dentro de la subunidad de riego, en general, se recomienda seleccionar 16 emisores para cada subunidad de riego.

Para ello, se eligen los laterales más cercano y más lejanos de la toma de la tubería terciaria y dos intermedios situados a $1/3$ y $2/3$ de la distancia que separa del primer al último lateral. De igual manera dentro de cada lateral elegido, se seleccionará el primer y último emisor, así como dos emisores intermedios situados a $1/3$ y $2/3$ de la distancia que separa del primer al último emisor.

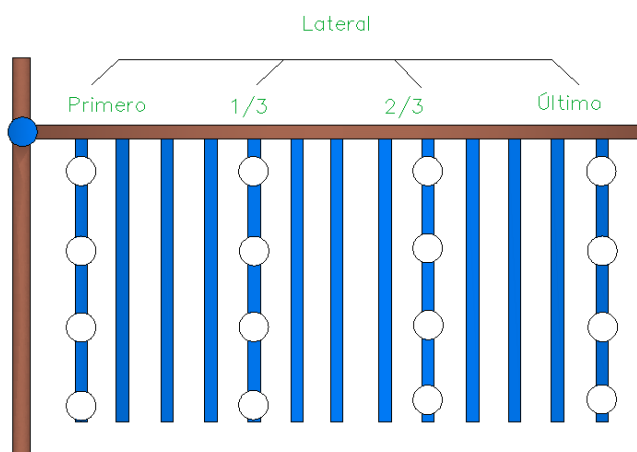


Figura 29. Laterales y emisores que se deben seleccionar para evaluar una subunidad de riego localizado
(Salas et al. 2007)

Con una probeta o un vaso graduado se medirá el volumen de agua suministrado por cada emisor seleccionado en un tiempo determinado, que será igual para todos de tres a cinco minutos para goteros y un minuto para tuberías goteadoras y exudantes; con estos datos se calculará el caudal en litros/hora.



Figura 30. Medida del caudal que suministra los emisores en riego localizado

Una vez conocido el caudal de cada uno de los emisores seleccionados se determina el *coeficiente de uniformidad de caudales* (CUc) aplicando la siguiente expresión:

$$CUc = \frac{q_{25\%}}{q_m} \cdot 100 \quad [Ec. 1.57]$$

Siendo:

- CUc: coeficiente de uniformidad de caudales.
- $q_{25\%}$: media de los caudales de los emisores que representan la parte de más bajo.
- q_m : media de los caudales medidos en todos los emisores.

El *coeficiente de uniformidad de presiones* (Cup) determina la homogeneidad de las presiones en los emisores en la subunidad de riego localizado, para calcular este coeficiente se medirán las presiones en cada uno de los emisores siempre que sus características o forma de inserción en el lateral lo permitan.

Para su cálculo, escogemos un número determinado de emisores representativos de la subunidad de riego, se determina la presión en cada uno de los emisores con la ayuda de un manómetro.



Figura 31. Medida de la presión del agua utilizando un manómetro

Con los datos de presión de cada emisor seleccionado se encontrará el coeficiente de uniformidad de presiones:

$$CU_p = \left(\frac{P_{25\%}}{P_m} \right)^x \cdot 100 \quad [Ec. 1.58]$$

Siendo:

- CU_p: coeficiente de uniformidad de presiones
- p_{25%}: media de las presiones de los emisores que representan la parte de más bajo caudal
- p_m: media de las presiones medidas en todos los emisores
- x: coeficiente de descarga del emisor, característica que debe ser facilitada por el fabricante

Con el valor del coeficiente de uniformidad de caudales, es posible obtener el *coeficiente de uniformidad de riego de la unidad* (CU_{unidad}):

$$CU_{unidad} = f_c \cdot CU_{caudales} \quad [Ec. 1.59]$$

El *factor de corrección f_c* se determina midiendo la presión más desfavorable en cada una de las tuberías terciarias de la unidad de riego, para lo cual se considerará:

Para tuberías terciarias a nivel o en contra la pendiente la presión más desfavorable se medirá al final de la tubería donde comience el último lateral de riego, y para tuberías a favor de la pendiente la presión más desfavorable se medirá aproximadamente en los 2/3

de su longitud, cuando se realice por primera vez este ensayo se recomienda medir varias veces al final de la tubería terciaria por si el punto situado a los 2/3 no fuese el de menor presión.

$$f_c = \left(\frac{P_{25\%}}{P_m} \right)^* \cdot 100 \quad \text{[Ec. 1.60]}$$

Siendo:

- f_c : factor de corrección que depende de la diferencia entre presiones de las subunidades que forman parte de la unidad que se evaluará.
- $P_{25\%}$: media de las presiones medidas en las tuberías terciarias que representan la cuarta parte más baja presión.
- P_m : media de las presiones medidas en todas las tuberías terciarias.

El coeficiente de uniformidad de la instalación (CU). Será igual a la uniformidad calculada para la unidad elegida como representativa de la instalación, para que este cálculo sea válido las unidades y subunidades de riego deben ser homogéneas en lo referente a su superficie y forma.

Cuadro 10. Calificación de la instalación de riego en función la valor de CU

Coeficiente de Uniformidad	Calificación
Mayor de 95%	Excelente
85-95%	Buena
80-85%	Aceptable
70-80%	Pobre
Menor 70%	Inaceptable

El Coeficiente de variación de fabricación (CV). Es una medida de la dispersión de caudales respecto de la media, debido a razones constructivas es difícil lograr que todos los goteros de un mismo modelo proporcionen igual gasto a la misma presión. Este indicador se define con la ecuación: (Hurtado L. - Universidad Nacional Agraria La Molina):

$$CV = \frac{S}{q_m} \quad \text{[Ec. 1.61]}$$

Siendo:

- S : desviación típica respecto a la media de los caudales ensayados
- q_m : caudal medio

Cuanto más elevado es el valor de CV, menos uniformes son los emisores, por lo cual es posible clasificarlos en las siguientes categorías:

Categoría	Valor CV
A	$CV < 0'05$
B	$0'05 < CV < 0'10$
C	$CV > 0'10$

1.2.9. Riego por aspersión

El riego por aspersión permite proporcionar a los cultivos una precipitación artificial de intensidad controlada, ocasionando lluvia óptima; que se forma debido a que el agua fluye a presión a través de pequeños orificios (aspersores o difusores).

Las condiciones climáticas en especial el viento y la aridez del clima son factores determinantes para la aplicación del agua en forma de lluvia, puesto que si las gotas son muy pequeñas pueden desaparecer antes de tocar el suelo por efecto de la evaporación, en caso de ser muy gruesas ocasionan daños en el cultivo y suelo. (González, 2007).

Este tipo de riego es adecuado (Macías et al. 2011) aplicar para regadío ligero con el cual se aporta al cultivo algo de humedad, también es útil para realizar el lavado de sales cuando sea necesario.

Las ventajas del riego por aspersión se derivan fundamentalmente de dos aspectos:

- El control del riego sólo está limitado por las condiciones atmosféricas (pérdidas por evaporación o arrastre y efecto del viento sobre la uniformidad del reparto).
- La uniformidad de aplicación es independiente de las características hidrofísicas del suelo.

En estos sistemas se usan aspersores con cabeza giratoria, con cabeza fija, rociadores con boquilla y placas de impacto y también pequeñas perforaciones realizadas directamente en las tuberías. (Hurtado L, Universidad Nacional Agraria La Molina)

Los aspersores están provistos de una o más boquillas montadas sobre un cuerpo central por las que sale el agua a presión. El movimiento del aspersor es provocado por la presión

del agua que al salir se dispersa en forma de gotas mojando una superficie más o menos circular, cuyo alcance depende de la presión del agua y del tipo de aspersor.

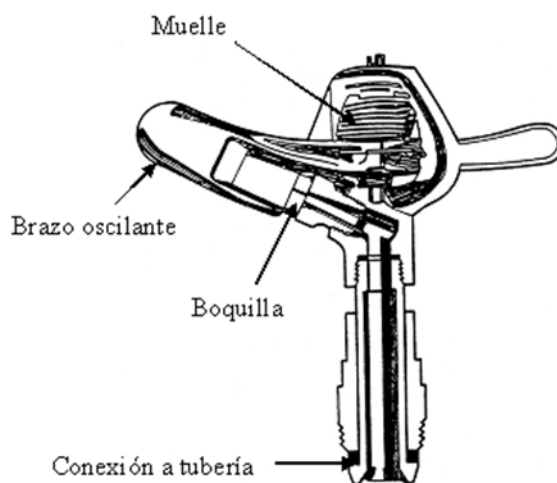


Figura 32.Componentes de un aspersor de impacto (Salas et al. 2007)

La distribución del agua sobre la superficie regada por un aspersor no es uniforme, para conseguir la mayor uniformidad posible deben disponerse lo suficientemente próximos entre sí de tal forma que se produzca un solape entre ellos.

Componentes de los sistemas de riego por aspersión

Un sistema de riego por aspersión está compuesto por varias partes, desde la captación, líneas de conducción, líneas de distribución, cámaras de carga, hidrantes, boquillas del aspersor hasta las válvulas que controlan la entrada de agua al sistema. Adicionalmente se considerarán algunos elementos que no están incluidos en la figura, en función de las necesidades en el regadío. (Salas et al. 2007)

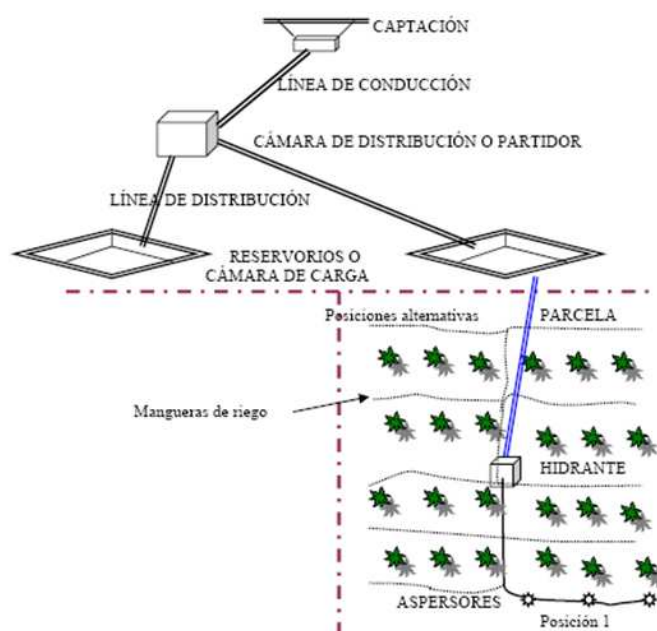


Figura 33. Elementos de riego por aspersión (Salas et al., 2007)

Clasificación de los sistemas de riego por aspersión.

Los sistemas de riego por aspersión se pueden clasificar en dos grupos (Macías et al. 2011):

- a) Sistemas estacionarios que permanecen en la misma posición mientras se efectúa las labores de regadío, que se clasifican en:
 - Sistemas móviles (portátil)

Todos los elementos de la instalación son móviles, puede serlo inclusive el grupo de bombeo, los ramales de riego suelen ser de aluminio o de PVC y se instalan sobre la superficie del terreno. Los ramales con los aspersores se trasladan a la siguiente posición cuando se culmina una postura, para lo cual se necesita de gran cantidad de mano de obra.

Estos equipos se instalan para aplicar riego eventual o como soluciones de emergencia.

- Sistemas semifijos

El grupo de bombeo y las redes principales que van enterradas son fijas, y pueden ser de PVC o fibrocemento, de ella derivan los hidrantes en donde se acoplan los ramales de

distribución (fijos o móviles), a los que se conectan los ramales de riego que son móviles. Estos ramales deben ser fácilmente transportables por lo que deben ser de materiales ligeros (aluminio o PE) y resistirlos efectos de la intemperie; a los ramales se acoplan los aspersores directamente, o con manguera.

- **Sistemas fijos.**

Todos los elementos de este sistema son fijos (bombeo, red de riego y emisores), salvo en algunos casos donde los aspersores son desmontables y van ocupando sucesivas posiciones a lo largo de los ramales de riego.

- b) **Sistemas mecanizados que se desplazan mientras aplican el agua de riego y pueden ser:**

- **Cañones de riego.**

El cañón motorizado de riego consta de un aspersor de gran alcance y caudal (cañón) montado sobre un carro o patín y conectado al suministro de agua mediante una manguera. Este sistema de riego utiliza aspersores rotativos de gran tamaño, que funcionan con una elevada presión y forman gotas grandes.

- **Pivotes**

Es un ramal de riego con un extremo fijo, por el que recibe el agua y la energía eléctrica, y otro móvil que describe un círculo girando alrededor del primero. El equipo de riego se basa en el movimiento de una tubería porta-emisores que se apoya en unas torres automotrices, estas torres están provistas de un motor eléctrico y dos ruedas neumáticas.

Normalmente los pivotes riegan un círculo completo aunque también se instalan para el riego de medio círculo.

- **Lateral de avance frontal.**

La tubería porta-emisores, los emisores y los sistemas de propulsión son semejantes al pivote, consiste en un ramal de riego montado sobre unas torres automotrices de dos ruedas que se desplazan en sentido perpendicular al ramal de riego y riega superficies de forma rectangular.

1.3. Métodos de diseño óptimos

En Ingeniería, el principal objetivo de la optimización es encontrar la “mejor” solución a un problema en términos de calidad, coste, fiabilidad o cualquier otro criterio de utilidad. Estos problemas se describen a través de elementos fundamentales como (Pérez, 1993):

- Las variables de decisión. Son los valores que se modifican para resolver el problema.
- La función objetivo. Se expresa en función de las variables de decisión y el resultado de su evaluación es el que se desea optimizar (maximizar o minimizar).
- Las restricciones. Es el conjunto de leyes de comportamiento del sistema, que se representa con desigualdades o ecuaciones que se tienen que cumplir para que la solución se considere factible.

El conjunto formado por la función objetivo y las restricciones se denomina modelo matemático, que es una abstracción simplificada del comportamiento de los elementos que la componen y de las relaciones que existen entre ellos.

Podemos distinguir los siguientes tipos:

- a) Optimización local.* Donde se parte de una solución inicial y se busca algún mínimo local (cercano).
- b) Optimización global.* Donde se intenta encontrar la mejor solución entre todas las posibles soluciones.

Naturaleza de las variables de diseño.

- *Primera categoría,* (variables discretas). El objetivo es encontrar un conjunto de parámetros de diseño que hacen una función determinada de estos parámetros mínimos o máximos sujetos a ciertas limitaciones. Un ejemplo podría ser encontrar los diámetros mínimos de una red, sujeta a cierta limitación de presión.

- *Segunda categoría*, (variables continuas). Se basa en encontrar un conjunto de parámetros de diseño, que son funciones continuas de algún otro parámetro, que reduce al mínimo un tema de función objetivo de un conjunto de restricciones.

1.3.1. Clasificación de las técnicas de optimización

El problema de optimización se clasifica en base de la naturaleza de las ecuaciones con respecto a las variables de diseño. Pérez (1993) realiza en forma general una clasificación de los problemas de optimización, así como de las técnicas disponibles para resolverlas:

- 1) Técnicas de cálculo diferencial clásico. Cuando el problema no tiene restricciones, el óptimo se lo obtiene por cálculo diferencial, y en cuando existan restricciones se transformará en uno equivalente por medio de la técnica de los multiplicadores de Lagrange.
- 2) Programación Lineal (PL) u Optimización lineal. Todas las funciones son combinaciones lineales de las variables de decisión del problema, y radica en encontrar el mínimo o máximo de una función objetivo de naturaleza lineal, sujeta a un conjunto de restricciones lineales; el algoritmo más conocido para resolver el problema de PL es el Simplex.
- 3) Optimización no lineal convexa. Contiene al menos una función no lineal, en función del tipo de problema se pueden presentar diferentes soluciones:
 - Linealización.
 - Programación cuadrática.
 - Método de gradiente.
- 4) Optimización no convexa. Puede contener óptimos locales, los procedimientos que se aplican a los casos no convexos son:
 - Enumeración explícita.
 - Enumeración implícita o parcial.
- 5) Métodos heurísticos. Permiten mejorar una solución inicial mediante una aproximación racional.
- 6) Problemas especiales. Dentro de este caso tenemos la programación dinámica, es adecuada en casos en los que el sistema puede ser desintegrado en etapas.

En las últimas décadas se han desarrollado diversas técnicas heurísticas, cuyas soluciones se obtienen por la evaluación del progreso logrado en la búsqueda de un resultado final. Estas técnicas no aseguran un resultado óptimo, pero la calidad de las soluciones obtenidas puede ser mejorada mediante una adecuada combinación (hibridación) de varios métodos que permitan aprovechar los recursos de cada una de las técnicas que se desee combinar, con lo cual se mejorará la calidad y solución.

Baños (2006) manifiesta que la complejidad de los problemas de optimización está en función de los parámetros de entrada, usualmente del tamaño del problema a resolver, y cuando éste aumenta, el problema se torna muy complejo e inabordable; por ello no es factible resolverlo con técnicas deterministas. Gracias a los recursos informáticos, cada vez más potentes, este tipo de técnicas ha cobrado un gran impulso en las últimas décadas.

Con el objetivo de disminuir el recurso computacional de la resolución de los problemas, se ha propuesto combinar las técnicas anteriormente descritas dentro de métodos conocidos como híbridos.

1.3.2. Métodos híbridos (MH)

Un método híbrido es aquel que integra dos o más métodos diferentes. Son la alternativa para unir técnicas complementarias, buscando el mejor aprovechamiento de la información y la solución más idónea a un problema particular. Si partimos de este concepto, el híbrido es entonces algo diferente de las partes de que lo componen, pues toma elementos de todas ellas para convertirse en algo nuevo.

En este campo se pueden mencionar, por ejemplo, técnicas de descomposición que utilizan herramientas heurísticas o meta heurísticas¹ para una parte del problema y técnicas de

¹Los Meta heurísticos proporcionan un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos combinando diferentes conceptos derivados de la inteligencia artificial, la evolución biológica y los mecanismos estadísticos

optimización matemática para la otra. Cada técnica pretende aprovechar sus ventajas para la solución de problemas reales; sin embargo, muchas investigaciones han demostrado que con la unión de algunas técnicas se obtiene una mejor respuesta a la necesidad planteada por algún problema específico.

Mora (2010) manifiesta que el uso de esta metodología permite obtener ciertas ventajas:

- Con la integración de dos técnicas complementarias es posible suplir las deficiencias de la otra, de forma que se obtenga mejor desempeño.
- El uso de diferentes técnicas amplía la capacidad del sistema para recibir nueva información, mientras que un solo método aumenta las restricciones dificultando la solución del problema.
- Algunos sistemas complejos que no pueden ser tratados empleando una sola técnica, deben subdividirse para encontrar su solución y luego tratarlos como un todo encontrando la solución global óptima.

En nuestro caso el problema consiste en realizar la optimización de costes en el diseño de las líneas que conforman redes de riego presurizadas, en concreto minimizar el coste total del rubro tuberías, sujeta a una serie de restricciones. Para ello se propone un método híbrido que combina una técnica evolutiva a través de los algoritmos genéticos (AG), y la programación lineal (PL), obteniendo de este modo una buena aproximación a la solución.

A partir de la fundamentación teórica básica y del análisis de ventajas y desventajas de cada uno de los métodos mencionados, se presenta una propuesta para abordar la asignación de hidrantes de los nudos de una red ramificada de riego que genera el mínimo coste en los diámetros de tuberías empleadas.

El algoritmo del método híbrido implementado se desarrolló utilizando la técnica basada en PL, que permite obtener el mínimo coste de los diámetros de tuberías de cada línea de la red, mientras que el algoritmo evolutivo tiene como función la de realizar la combinación adecuada de los hidrantes de los nudos de la red que nos permite llegar al objetivo propuesto.

1.3.3. Algoritmos genéticos AG

Para la ingeniería, los algoritmos genéticos y la programación evolutiva en general presentan oportunidades de plantearse problemas que no es posible resolver con la aplicación de técnicas convencionales. Sus principios básicos, fueron formulados por Holland (1975), y Goldberg (1989). Davis (1991), Michalewicz (1992), Reeves (1993); realizan un descripción extensa del mismo.

Los AG se fundamentan en el proceso genético de los organismos vivos: las poblaciones evolucionan en la naturaleza de acuerdo con los principios de la selección natural y la supervivencia de los más fuertes (Darwin, 1859), imitando este proceso, son capaces de ir desarrollando soluciones para problemas reales (Gil, 2006). Los AG usan una analogía directa con el comportamiento natural, trabajando con una población de individuos, cada uno de los cuales representa una solución (factible o no) a un problema dado; a cada individuo se le determina un valor o puntuación, relacionado con la bondad de dicha solución. En la naturaleza esto equivaldría al grado de efectividad de un organismo para competir por unos determinados recursos.

Cuanto mayor sea la adaptación de un individuo al problema, mayor será la probabilidad de que éste sea seleccionado para reproducirse, cruzando su material genético con otro individuo escogido de igual forma; este cruce producirá nuevos individuos descendientes de los anteriores que comparten algunas de las características de sus padres. Y cuanto menor sea la adaptación de un individuo, menor será la probabilidad de que dicho individuo sea seleccionado para la reproducción, y por tanto de que su material genético se propague en sucesivas generaciones.

Si el algoritmo genético ha sido bien diseñado, la población convergerá hacia una solución óptima del problema.

Ventajas de usar AG (Gil, 2006):

- Trabajan con una codificación de un conjunto de parámetros.
- Su técnica de búsqueda es global, utilizan un subconjunto del espacio total para obtener información sobre el universo de búsqueda a través de las evaluaciones de la función a optimizar. Esas evaluaciones se emplean de forma eficiente para clasificar los subconjuntos de acuerdo con su idoneidad

- No están sujetos a restricciones, se pueden aplicar a funciones no continuas.
- Utilizan operadores probabilísticos en lugar de los operadores determinísticos de las técnicas tradicionales.
- Son fáciles de ejecutarlos en las modernas arquitecturas masivas en paralelo.
- Resultan menos afectados por los máximos locales cuando se usan para problemas de optimización.

Condiciones para utilizar un algoritmo genético:

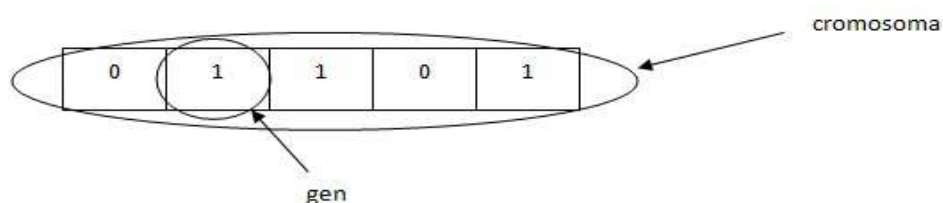
Según Gil (2006), se aplicará la técnica de algoritmos genéticos para resolver los problemas con las siguientes características:

- El espacio de búsqueda debe encontrarse delimitado dentro de un rango. Se debe intentar resolver problemas que tengan espacios de búsqueda discretos no obstante a su gran tamaño.
- Debe permitir definir una función de aptitud que indique que tan buena o mala es la respuesta.
- Las soluciones deben codificarse de tal manera que sea relativamente fácil de implementar en el computador.

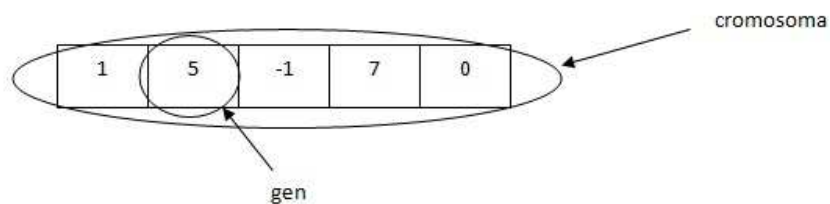
Tipos de codificación:

Los individuos se pueden representar como un conjunto de parámetros que denominaremos genes, que se agrupan y forman una cadena de valores que se define como cromosoma; los cuales se asignan con valores y originan tres tipos de codificación de genes:

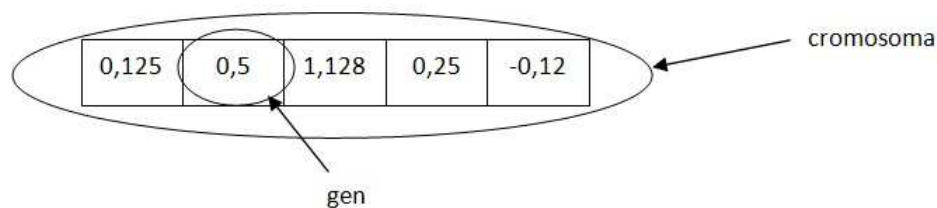
- Binaria. En ella se utiliza un vector cuya longitud es la del número de genes de cada individuo, el valor que toma cada elemento es un número binario.



- Entera. Se usa un vector con longitud igual al número de genes de cada individuo y el valor que adopta cada elemento es un número entero.



- Real. Se emplea un vector con longitud igual al número de genes de cada individuo y el valor que toma cada elemento es un número real.



Payá (2007), manifiesta que la estrategia de un algoritmo genético precisa de:

- Representación de las soluciones del problema.
- Forma de crear las soluciones potenciales.
- Una función de evaluación que juega el papel del ambiente, calificando a las soluciones producidas en términos de “aptitud”.
- Operadores genéticos que permiten generar nuevos individuos a partir de una población inicial y la hacen evolucionar.
- Valores para los parámetros del algoritmo.

Podemos describir la estructura básica de un AG como se muestra en la figura siguiente.

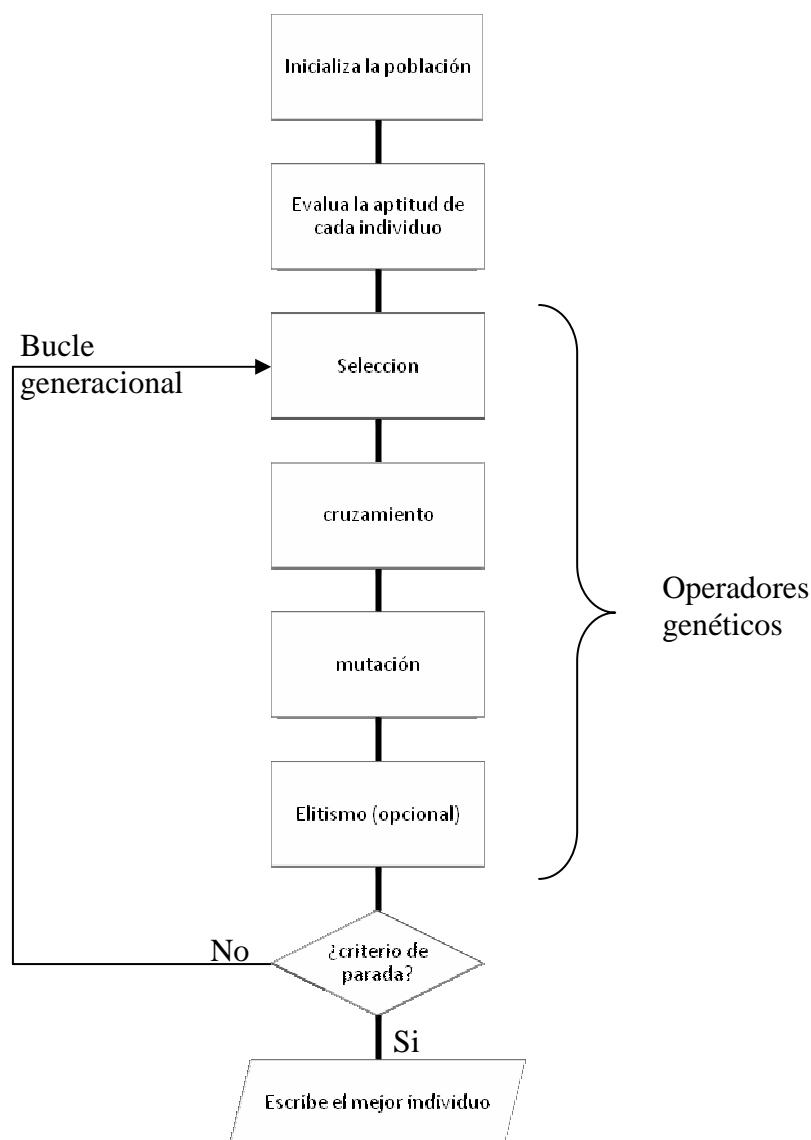


Figura 34. Diagrama de flujo de un AG básico (Payá, 2007)

El algoritmo se inicia con la creación de una población inicial de individuos (normalmente de un modo aleatorio, aunque podrían usarse métodos determinísticos). Posteriormente se asigna una aptitud a cada uno de los elementos de la población dependiendo de su valor de la función objetivo y del grado de cumplimiento de las restricciones del problema. Seguidamente, ciertos individuos de esta población son seleccionados de acuerdo con ciertas reglas (operador “selección”) y combinados entre sí (operador “crossover” o “cruzamiento”) para crear una nueva población. Finalmente se emplean los operadores “mutación”, para introducir nuevas características en la población de modo que su evolución no se estanque prematuramente. Este proceso se repite hasta que se cumple el criterio de convergencia del algoritmo.

Operadores genéticos

Es una función empleada en los algoritmos genéticos para mantener la diversidad genética de una población, un AG consta de los siguientes operadores: selección, reproducción, cruce (crossover) y mutación.

a) Selección

Es un conjunto de reglas que sirven para elegir a los progenitores de la siguiente generación, los mismos que se reproducirán (cruzamiento genético) y generarán descendencia, este operador permite orientar la búsqueda hacia los puntos más prometedores del espacio de soluciones y genera a partir de la población de partida, otra intermedia.

Los métodos de selección pueden clasificarse en tres grupos: selección proporcional, por torneo y de estado uniforme, la técnica de selección proporcional de la ruleta es la más empleada (Coello, 2004), fue propuesta por De Jong (1975), siendo la probabilidad de elección de un individuo proporcional a su aptitud.

b) Reproducción

En este contexto, se entenderá por “reproducción” la clonación de un individuo. Es decir, un individuo, en función de su aptitud, pasará a la siguiente generación sin modificación, incluyendo varias copias de sí mismo. El objetivo de la reproducción es mantener y aumentar en la siguiente generación a individuos con una buena función de aptitud. Se intenta mantener a los mejores individuos de una generación a la siguiente, para que no se pierda su información.

c) Cruce o Crossover

Es el más importante de los operadores genéticos, permite el intercambio de la información entre dos o más padres para producir descendientes (o hijos) que normalmente difieren de ellos. Este operador es el responsable de efectuar la búsqueda a lo largo del espacio de posibles soluciones, los individuos seleccionados en la fase anterior se cruzan o mezclan;

la idea es que, segmentos distintos de padres diferentes con alta aptitud, deberían producir al combinarse nuevos individuos también muy aptos.

d) Mutación

Es un operador básico, responsable del aumento o reducción del espacio de búsqueda dentro del algoritmo genético y mantiene la diversidad genética de la población. El propósito de la mutación es proveer un mecanismo para escapar de los óptimos locales, así como desplazar a los individuos hacia zonas del espacio de búsqueda que no pueden ser alcanzadas por medio de otros operadores genéticos.

1.3.4. Programación lineal

La programación lineal (PL), trata exclusivamente con funciones objetivos y restricciones lineales; es una parte de la programación matemática, y una de las áreas más importantes de la matemática aplicada. Cualquier problema de programación lineal requiere identificar cuatro componentes fundamentales (Castillo et al. 2002):

- El conjunto de datos.
- El conjunto de variables involucradas en el problema, junto con sus dominios respectivos de definición.
- El conjunto de restricciones lineales del problema que definen el conjunto de soluciones admisibles.
- La función lineal que debe ser optimizada (minimizada o maximizada).

1.3.5. Dimensionamiento de redes ramificadas por medio de PL

El Modelo de Programación lineal ha sido tratado por diversos autores como: Labye (1966); Karmeli et al. (1968); Calhoun (1970), y en la misma línea, Robinson y Austin, (1976); Bhave (1979); Pleban y Amir (1981) y Martínez et al. (1987). Este modelo se fundamenta en la hipótesis de que una línea de la red puede estar constituida por varios tramos de diferentes diámetros, si el conjunto de diámetros que se disponen son comerciales, la solución obtenida no necesitará ningún ajuste posterior para ser implementada.

Haciendo referencia al criterio matemático, es un problema convexo, que no posee óptimos locales, aquí es posible encontrar dos situaciones: si las restricciones son incompatibles entre sí, el conjunto de soluciones es vacío y no existe soluciones. En caso de que el espacio es no vacío, puede existir una o infinitas soluciones óptimas con el mismo coste asociado (Pérez, 1993).

- *Redes con altura de cabecera conocida*

Se trata de dimensionar en forma óptima los diámetros de una red ramificada que tiene n líneas, con nudo de cabecera fijo (nudo 0) y de altura conocida H_0 , esta red tiene un conjunto de nudos K , en donde se incluirán todos los nudos terminales que deben tener una altura piezométrica mayor o igual a un valor mínimo H_k . Lo que se traduce en limitar la pérdida de carga en los trayectos que se encuentran entre el nudo 0 y un nudo genérico K , de tal forma que:

EMBED Equation.3

[Ec. 1.62]

Siendo:

$h_{f,i}$:	pérdida de carga (m) en la línea i
S_k :	conjunto de líneas pertenecientes al trayecto entre los nudos 0 y k
ΔH_k :	máxima pérdida de carga admisible (m) en el trayecto comprendido entre los nudos 0 y k .

La formulación de este modelo es exacta, ya que si se considera tramos de diámetro uniforme en la línea, el coste del tramo, y la pérdida de carga que se generan son funciones lineales de la longitud del tramo, de modo que tanto la función objetivo como las restricciones resultan ser funciones lineales de las longitudes parciales de los tramos de diámetro uniforme.

El problema de dimensionado óptimo radicará en minimizar la función objetivo, coste total de las tuberías de la línea i que se representa en la figura 35 y, configurada por los costes asociados a las tuberías,

EMBED Equation. 3

[Ec. 1.63]

Donde:

- C_i : coste total de las tuberías de la línea i (\$)
- C_j : coste unitario del diámetro D (\$/metro lineal)
- L_{ij} : longitud del tramo de diámetro D en la línea i (m)

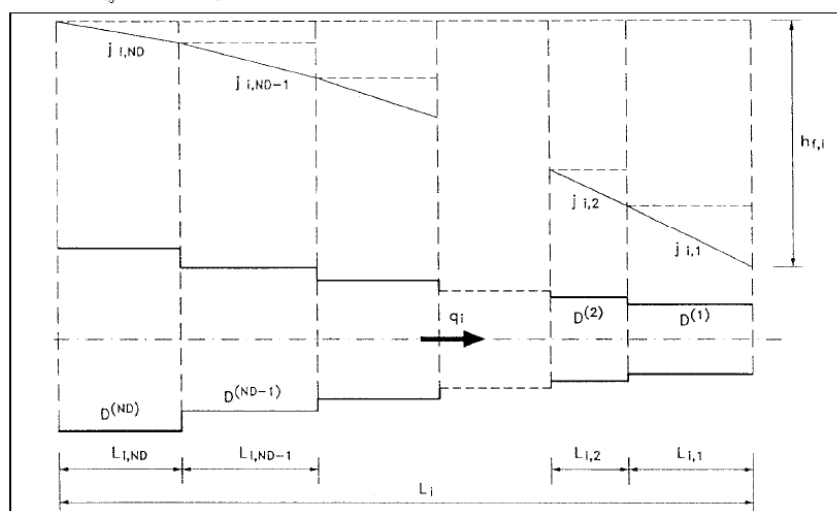


Figura 35. Línea formada por varios tramos de diferente diámetro (Pérez, 1993)

En donde se deberán cumplir las restricciones de presión mínima del tipo:

EMBED Equation. DSMT4 **EMBED Equation. 3** **[Ec. 1.64]**

Estas restricciones se pueden plantear para cualquier nudo de la red además de los extremos o terminales, se trate o no de un nudo de consumo, en el que se deba asegurar una presión mínima. Cuanto mayor sea el número de restricciones de presión mínima, tanto mayor será el tamaño del modelo y la complejidad de su resolución (Pérez, 1993).

Será necesario también plantear restricciones de tipo geométrico, a fin de asegurar que la suma de las longitudes parciales L_{ij} , en una línea sea estrictamente igual a la longitud total de la misma:

EMBED Equation. 3 **EMBED Equation. 3**

[Ec. 1.65]

El problema lineal puede ser resuelto por cualquiera de los paquetes de software de PL, lo que conlleva al inconveniente de exigir al usuario la introducción de una gran cantidad de información con lo cual el tamaño del software disponible se verá limitado.

Por lo tanto, será interesante e incluso necesario, reducir el tamaño del modelo a través de disminuir la cantidad de nudos con restricciones de presión mínima y con la disminución del conjunto de diámetros candidatos.

Al respecto de esta cuestión, Alperovits y Shamir (1977) proponen usar inicialmente sólo las restricciones de presión que correspondan a los nudos terminales y luego se ajustará este parámetro para los nudos particulares que posean su valor por debajo del mínimo. Otra posibilidad es reducir el número de diámetros que se utiliza en cada línea, disminuyendo por tanto el rango de diámetros candidatos.

Bhave (1979) plantea que el conjunto óptimo de diámetros candidatos para la línea i , puede tener dos diámetros normalizados consecutivos en tamaño, de tal manera que $D_i(1) \leq D_i \leq D_i(2)$, y en algunos casos, en forma excepcional, se adoptaría tres e incluso cuatro.

Pleban y Amir (1981) consideran la selección de tres diámetros candidatos consecutivos en tamaño por línea, con criterio de proximidad a un diámetro teórico estimado D_i para asegurar que la solución óptima es global, esto es que los diámetros óptimos de cada línea en la solución final se encuentren en el centro de la gama escogida.

El número mínimo de diámetros candidatos en la solución final es de dos, se busca un número de variables crecientes con el número de diámetros candidatos por línea y un número de operaciones necesarias mayor, cuanto menor sea el número de diámetros candidatos.

Aspectos particulares del problema:

- a) Restricciones de velocidad. Se la realiza en la fase de selección de los diámetros candidatos de una línea de la red, la limitación de la velocidad mínima proporciona el valor del diámetro máximo y la limitación de la velocidad máxima el de diámetro mínimo.

- b) Costes energéticos. Es necesario conocer los costes de la potencia media usada durante las horas anuales de bombeo, lo que permitirá contratar el suministro eléctrico en función de la modulación horaria del bombeo.
- c) Dimensionamiento de ampliaciones. Será resuelto a través del modelo lineal modificando las restricciones de presión mínima, de modo que la presencia de las tuberías instaladas se asociará a una pérdida de carga adicional.
- d) Limitación de presiones máximas. Cuando el nudo de alimentación es fijo y conocido, los valores de las presiones máximas en régimen permanente están dadas por dicho valor y para modificarlo se introducirán elementos auxiliares.

La figura 36 describe el procedimiento para obtener el dimensionamiento óptimo mediante programación lineal de redes ramificadas:

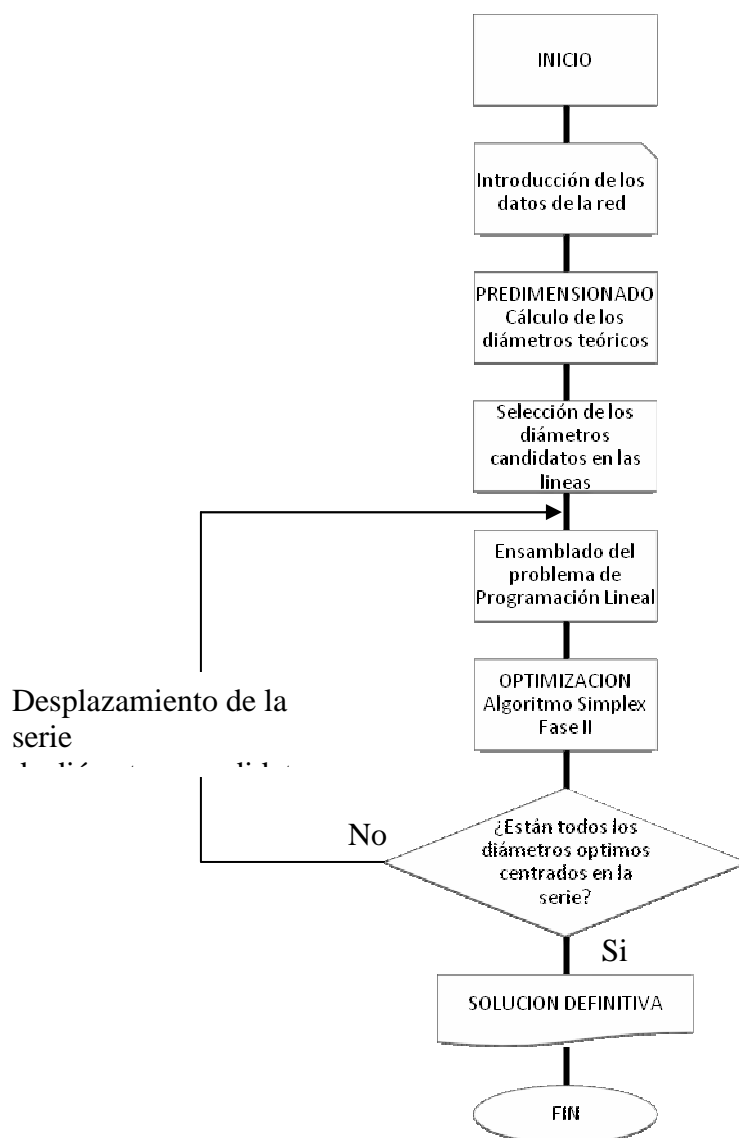


Figura 36. Secuencia para dimensionado óptimo de redes (Pérez, 1993)

1.3.6. Modelo de PL aplicado al diseño óptimo de una red por turnos

Este modelo pertenece a múltiples estados de carga como hipótesis de diseño, los mismos que corresponden a los diferentes turnos que se asignan a cada nudo de la red, para los cuales deberán cumplirse las condiciones de función objetivo y restricciones que señalaremos.

Caso de altura de cabecera conocida:

Se ha considerado múltiples estados de carga es decir n turnos, considerando una fuente de alimentación con altura piezométrica conocida como hipótesis de diseño.

La formulación global del problema de dimensionado óptimo consistirá en minimizar la siguiente función objetivo, configurada por los costes asociados a las tuberías, esto es:

EMBED Equation.3 **[Ec. 1.66]**

Siendo:

- C_i : coste total de las tuberías de la línea i (\$)
- C_j : coste unitario del diámetro D (\$/metro lineal)
- L_{ij} : longitud del tramo de diámetro D en la línea i (m)

Y sometida a unas restricciones de presión mínima:

EMBED Equation.3 **[Ec. 1.67]**

Siendo:

- $J_{i,j,k}L_{i,j}$: pérdida de carga (m) en la línea i , con el diámetro j , y en el turno k
- $S_{0,m,k}$: conjunto de líneas pertenecientes al trayecto entre los nudos 0 y m , en el turno k
- $\Delta H_{o,m,k}$: máxima pérdida de carga admisible (m) en el trayecto comprendido entre los nudos 0 y m , en el turno k que corresponda.

Además es necesario plantear también restricciones de tipo geométrico, a fin de asegurar que la suma de las longitudes parciales L_{ij} , en una línea sea exactamente igual a la longitud de la misma:

$$\sum_{j=1}^{ND} L_{i,j} = L_i \quad \forall \text{ línea } i \quad \text{[Ec. 1.68]}$$

Para evitar los problemas de sedimentación típicos en las tuberías con baja velocidad de transporte de fluidos y los problemas de erosión ocasionados por las altas velocidades, se ha considerado velocidades límite en el rango de [0'50; 2'00] m/s. Por este motivo se ha determinado, para cada uno de los diámetros comerciales de la serie escogida para el diseño, la velocidad en cada una de los diámetros de las tuberías de cada turno. Se ha obtenido una matriz superponiendo los rangos de diámetros que se obtienen en cada línea que corresponde a cada turno de riego (de modo que no quede excluido ningún diámetro que ha sido admitido en alguno de los turnos).

De esta manera se definen las ventanas de diámetros candidatos por limitaciones de velocidad, de manera que el problema queda mucho más acotado y el número de condiciones y restricciones necesarias para resolverlo disminuye consecuentemente.

Una vez resuelto el problema, comprobamos que el rango adoptado no condiciona en ningún momento con la solución del problema, puesto que dentro de cada una de las ventanas de diámetros candidatos abierta para cada una de las líneas, los resultados de la optimización quedan centrados dentro del rango de resultados factibles.

Caso de altura de cabecera incógnita (p.e.: bombeo con Hb incógnita):

Para este caso particular lo que se hace intervenir es la variable altura de bombeo y en el coste total el valor de amortización del coste que implica el rubro tuberías, que queda expresado en:

$$\text{EMBED Equation. DSMT4} \quad (\text{coste energético} + \text{amortización del } c) \quad [\text{Ec. 1.69}]$$

Sometido a restricciones de presión mínima:

$$\text{EMBED Equation. 3} \quad [\text{Ec. 1.70}]$$

Siendo:

H_b : Altura de bombeo

Considerándose además la restricción de tipo geométrico

$$\sum_{j=1}^{ND} L_{i,j} = L_i \quad \forall \text{ línea } i \quad \text{[Ec. 1.71]}$$

1.3.7. Diseño de redes hidráulicas y su coste económico

Cuando consideramos el recurso económico como criterio de optimización, entonces estamos tratando de un diseño económico, en donde se encontrará la mejor solución viable y correcta de un conjunto de posibles soluciones que represente la menor inversión económica (Pérez, 1993)

Este problema se formula en términos de una función objetivo que incluye todos los costes asociados a un sistema, y de restricciones que representan las leyes físicas que rigen el funcionamiento del mismo y las condiciones de trabajo que se espera obtener del mismo.

Para considerar el recurso económico, en un problema de diseño que es factible resolverlo hidráulicamente, necesitamos conocer los costos que se asocian al mismo.

Clasificación de los costes que forma parte en el diseño de una red

Pérez (1993) realiza una clasificación de los costes como sigue:

- Costes de construcción (costes fijos). Son los costos que se realizan obligatoriamente en la implementación y construcción de la red de distribución para que funcione satisfactoriamente y cumpla con el objetivo proyectado.
- Costes de explotación, (costes variables). Son los costos que se efectúan para que el sistema tenga funcionamiento eficiente.

COSTES DE	TUBERIAS
-----------	----------

CONSTRUCCION (Costes fijos)	ACCESORIOS	Acoplamientos Anclajes Juntas Valvuleria
	OBRA CIVIL	Excavación Relleno Asentamiento Depósitos
	INSTALACIONES	Estaciones de bombeo Sistemas de control y regulación Seguridad

COSTES DE OPERACIÓN (Costes Variables)	ENERGETICOS
	MANTENIMIENTO
	PERSONAL

Figura 37. Costos que se generan en una red de distribución (Pérez, 1993)

Según menciona Stephenson (1981) el coste de tuberías puede representar aproximadamente el 55% de la inversión, en tanto que los rubros de excavación, montaje y protección de la tubería en 25% de la inversión, lo que representa un costo en línea de conducción del orden de 80% de la inversión total; otros autores estiman este costo del orden de 75% de la inversión. Por otra parte, el costo que implica la estación de bombeo en situaciones convencionales está alrededor del 12% de la inversión, por tanto es posible concluir que el mayor importe de inversión económica se encuentra en el rubro de conducciones.

El costo energético constituye uno de los rubros importantes en el costo de explotación que puede ser muy elevado y alcanzar e incluso superar el valor de la amortización anual de la inversión, mientras que los costos de mantenimiento y personal alcanzarán un costo pequeño de la amortización anual de la inversión.

Balance entre los costes implicados en el diseño de una red.-

El costo de inversión es el pago del capital que se debe realizar para implantar la construcción y colocar en servicio la red; en tanto que los gastos de operación se refieren a la inversión periódica que se realiza para que la red se encuentre trabajando en forma eficaz. Estos gastos se refieren en forma anual, por lo tanto se expresarán en unidades

monetarias por año, dentro de este contexto es necesario expresar todos los gastos generados considerando una base temporal única, para lo cual:

- Durante la vida útil del proyecto, es necesario considerar los costos totales de inversión y de gastos de operación generados.
- Con el objeto de establecer comparaciones entre los costes de operación y de inversión, se deberán referir éstos a un término anual que es la amortización.

Al considerar la depreciación de la unidad monetaria, el capital que se ha invertido en la actualidad tiene un valor más elevado, que aquel que se usará en un mes o dos meses posteriormente; por lo tanto proporciona beneficios cuando ha sido utilizado generando otros recursos. Se concibe, por tanto un interés que debe pagarse por el uso del dinero prestado, y haciendo referencia al coste de oportunidad en donde se deja de percibir el beneficio de invertir un recurso económico en una actividad específica y no en otra.

El valor temporal de la unidad monetaria es el interés que se deberá pagar por su uso durante un período de tiempo, lo que facilita la comparación de los pagos en una base temporal. También permitirá transformar los pagos efectuados en diferentes periodos en cantidades equivalentes mediante el descuento y la acumulación (Pérez, 1993).

Por lo tanto tenemos:

$$C' = (1 + r')^T C \quad \text{[Ec. 1.72]}$$

Siendo:

C:	cantidad C en el presente
C':	cantidad futura
T:	número de años
r'	interés

El efecto económico de la inflación también influirá en el proyecto a mediado y a largo plazo, en los costes de operación periódicos y de igual manera al sustituir los equipos, que alcanzarán un costo superior al original cuando han cumplido su vida útil, lo que se traduce en:

$$G' = (1 + s)^T G \quad \text{[Ec. 1.73]}$$

Siendo:

G`:	costo al futuro
s:	tasa de inflación
G:	costo actual

En consecuencia, una cantidad de dinero C resultará depreciada por efecto de la inflación, de tal forma que luego de T años, su poder adquisitivo será:

$$C' = \frac{C}{(1 + s)^T} \quad \text{[Ec. 1.74]}$$

Si tomamos en cuenta los efectos combinados del interés r' y la tasa de inflación s, el valor real del dinero C luego de T años será:

$$C' = \frac{(1 + r')^T}{(1 + s)^T} \times C \quad \text{[Ec. 1.75]}$$

Que se puede combinar en la tasa de interés real r:

$$1 + r = \frac{1 + r'}{1 + s} \quad \rightarrow \quad C' = (1 + r)^T \cdot C \quad \text{[Ec. 1.76]}$$

Con el objeto de comparar los costes realizados en el diseño de una red, se deberá transportar a lo largo del tiempo a un único punto de partida único (inicio del proyecto), denominando a estas cantidades valor presente o actual y al proceso de obtenerla, actualización o descuento.

Podemos entonces manifestar que la cantidad C` al cabo de T años con un interés r representa un valor actual $C=C'/(1+r)^T$

Factor de amortización. Se lo usa para distribuir el coste de la inversión inicial en costes anuales de manera que sea factible compararlos con los costes anuales de operación del

proyecto. Por tanto el capital inicial invertido C , representa las cargas anuales de amortización de $C \cdot a_t$ unidades monetarias.

En la figura 38 se representa la amortización de una inversión inicial C en anualidades constantes, cuyo valor es el producto del capital invertido por el factor de amortización.

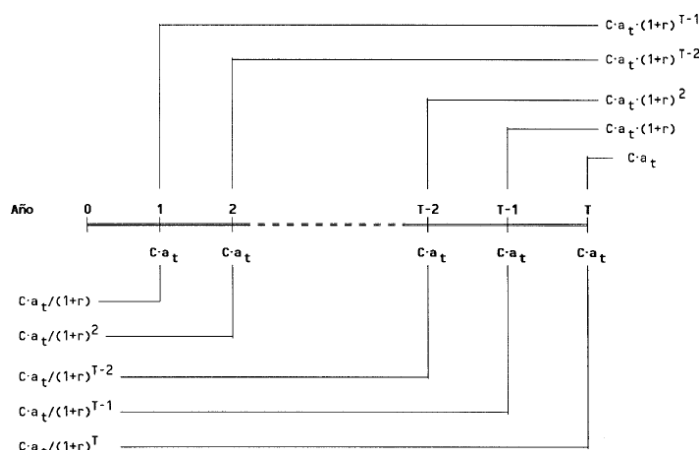


Figura 38. Amortización con anualidades constantes (Perez, 1993)

Por tanto, el factor de amortización no es más que la depreciación de un valor en el transcurso de su vida útil y se calcula a partir de dos parámetros importantes: el período de vida T del proyecto y la tasa de interés real r de la amortización, que representa el coste de oportunidad.

El coste anual del sistema es equivalente al coste de amortización de la inversión más el coste de operación del mismo.

$$\text{Coste anual del sistema} = [\text{inversión}] \cdot a_t + [\text{coste anual de operación}] \cdot \frac{1}{1+r} \quad [Ec. 1.]$$

Hernández et al. (1992) propone incluir el efecto inflacionario sobre los costes de operación en el coste energético, actualizando los mismos al inicio del proyecto y distribuyéndolos en anualidades constantes en lo posterior; con lo cual este valor será equivalente al coste energético en el primer año de funcionamiento de la red, multiplicada por el factor de coste equivalente anual de la energía (EAE).

Cuando priorizamos el coste energético en el diseño económico de una red, la solución óptima es aumentar los costes de inversión y disminuir los costes de operación (Pérez, 1993).

Estimación de costes

Para abordar el diseño económico de una red de distribución, es necesario definir las funciones de coste asociadas a los elementos que intervienen en ella. Según Orth (1986) las funciones de coste están sometidas a tres tipos de influencia: funcional, sistemático y aleatorio.

Las influencias sistemática (tipo de modelo, calidad del material) y aleatoria (fluctuaciones de precio en el mercado) definen el valor de los coeficientes de la función, aunque no modifican la estructura de la misma.

Considerando que las tuberías, depósitos y bombas son algunos de los elementos más importantes de una red, definiremos sus funciones de coste.

Tuberías.-

En una red hidráulica se considera como coste de construcción de una conducción a la adquisición, más el transporte y la instalación; expresada como:

$$C_c = (A_1 + A_2 \cdot D^a) \cdot L \quad 1 \leq a \leq 2 \quad \text{[Ec. 1.78]}$$

Siendo:

D:	diámetro de la conducción
L:	longitud
A ₁ , A ₂ :	constantes que dependen el tipo de material, presión de trabajo, etc.
C _c :	costo por metro de tubería

El costo de mantenimiento de las conducciones suele aproximarse a una relación proporcional a la longitud total de la misma, o como una fracción del costo de construcción.

Bombas.-

El parámetro que define el coste de construcción de una estación de bombeo es la potencia instalada W . El costo de construcción por Kilovatio (KW) instalado es decreciente con la potencia total instalada, y puede aproximarse con la siguiente expresión:

$$C_c = A_1 + A_2 \cdot W^a \quad 0 < a \leq 1 \quad [\text{Ec. 1.79}]$$

Siendo:

W : potencia instalada
 A_1, A_2, a : coeficientes de ajuste

Los componentes que forman parte del coste de operación de una estación de bombeo son los costes que se derivan del mantenimiento y conservación, y, el coste que se refiere a la facturación eléctrica anual, expresado en:

$$C_o = A_3 \cdot W + A_4 \cdot W_m \cdot t_m \quad [\text{Ec. 1.80}]$$

Siendo:

W : potencia instalada
 W_m : potencia media consumida en KW
 t_m : tiempo medio de utilización anual (horas/año)
 A_4 : coste del KW-h consumido
 A_3 : coste anual de un KW instalado, que puede incluir otros costes de operación que son proporcionales a la potencia instalada

Depósitos.-

En el caso de que dispongamos de un depósito, el coste de construcción será función de su volumen y se expresa:

$$C_c = A \cdot V^a \quad 0 < a \leq 1 \quad [\text{Ec. 1.81}]$$

Siendo:

V: volumen del depósito
A, a: coeficientes del ajuste

Y cuando se trate de depósitos elevados las variables que determinarán su coste serán el volumen y la altura a la que se encuentra ubicado.

El coste por unidad de capacidad (coste unitario del depósito) disminuye al aumentar el volumen del mismo. De acuerdo al volumen del depósito se puede ajustar el coste de operación, o considerar como una parte de los costos de construcción; se asume que el coste de la base del depósito no crece solamente por el efecto de una mayor altura, sino que demanda mayor robustez (Pérez 1993).

Problema del diseño

Este problema puede ser formulado matemáticamente (Lansey, 1989):

Minimizar coste:

$$f(H, D) \quad \text{[Ec. 1.82]}$$

Sujeto a:

- a) Las ecuaciones de continuidad
- b) Conservación de la energía
- c) Límites de altura
- d) Restricciones de diseño
- e) Restricciones generales

Los literales c, d y e son condiciones de funcionamiento que se impone el proyectista.

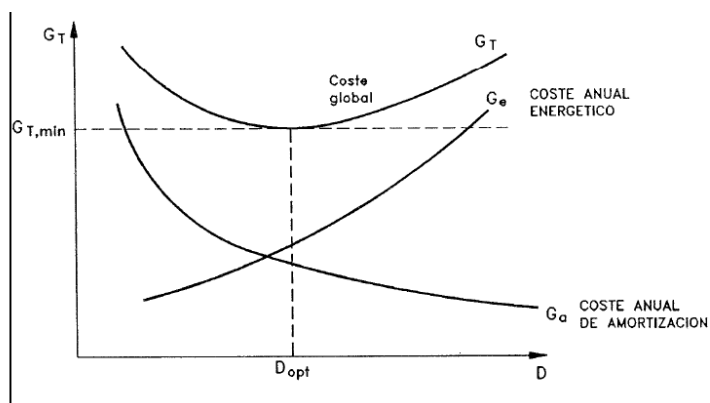
Diámetro económico

Pérez (1993) define como diámetro más económico, aquel valor mínimo que resulta de la suma de los costos anuales que corresponden a la energía consumida más el valor de la anualidad por la inversión efectuada, siendo la ecuación de diámetro óptimo:

$$[\text{Costes energéticos}]_{D_{opt}} + [\text{Costes de amortización}]_{D_{opt}} = \text{Costes mfnim} \quad [\text{Ec. 1.83}]$$

Que se representa en la figura 39 en función del diámetro D, y de cada uno de los sumandos.

Figura 39. Variación de costos anuales con el diámetro (Pérez, 1993)



Las variables que intervienen en la relación entre el coste por metro lineal y el diámetro de las tuberías son:

- Tipo de material y timbraje.
- Accesorios y uniones.
- Tipo de terreno y profundidad de las zanjas.
- Costes de excavación y movimientos de tierras.
- Autorizaciones, medidas de seguridad e higiene, etc.

Se proponen expresiones como:

$$c = A_1 + A_2 \cdot D^a \quad [\text{Ec. 1.84}]$$

Siendo:

- c: coste unitario de la tubería instalada (USD/m)
- D: diámetro en m
- a: adopta valores entre 1 y 2

Puesto que A_1 suele ser una constante la [Ec.1.84] se traduciría en:

$$c = A \cdot D^2 \quad [Ec. 1.85]$$

El sumando que corresponde a la inversión en tuberías C_{tub} será:

$$C_{tub}(\text{USD}) = A \cdot D^2 \cdot L \quad [Ec. 1.86]$$

Expresando esta ecuación en términos de coste anual, se calcula la anualidad de amortización a partir del tipo de interés previsto para el período de vida útil:

$$a_t = \frac{(1+r)^T \cdot r}{(1+r)^T - 1} \quad [Ec. 1.87]$$

Siendo:

a_t :	factor de amortización
r :	interés en tanto por uno
T :	período de amortización en años

Así el valor de la anualidad resulta:

$$G_a = A \cdot D^2 \cdot L \cdot a_t \quad [Ec. 1.88]$$

2. DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1. Antecedentes

La presente investigación se desarrolla en la República del Ecuador, situada en el noroeste de América del Sur entre las coordenadas geográficas 1° 28' N y 5° 01' S de latitud y los 75° 11' y 81° 00' W de longitud. Limita por el norte con Colombia, al sur y este con Perú y al oeste con el Océano Pacífico. Ecuador también incluye el archipiélago de las Islas Galápagos o Archipiélago de Colón, ubicado a 1.000 km al oeste del país en el Océano Pacífico.

La Cordillera de Los Andes divide Ecuador en tres regiones físicas bien definidas (i) la Costa, compuesta por llanos que se extienden desde el piedemonte de la Cordillera, a una altitud aproximada de 500 m, hasta la costa del Océano Pacífico, (ii) la Sierra que constituye una cadena de montañas con multitud de elevaciones, cubiertas de nieve buena parte del año (Cotopaxi, el volcán activo a mayor altitud del mundo con 5.897 m o el Chimborazo a 6.310 m). Estas cadenas montañosas están conectadas a intervalos por otras

transversales que dan lugar a amplios valles aislados y llanuras, denominadas hoyas, que llevan el nombre del río que fluye por ellas. Finalmente, se encuentra (iii) el Oriente, también llamado Región Amazónica, el cual comienza en la falda este de la Cordillera Este y se extiende hasta la frontera con Perú, toda ella dentro de la Cuenca del río Amazonas.



Figura 40. Regiones del Ecuador

El Ecuador, por su situación geográfica privilegiada, con todos los climas y la cultura de la actividad agropecuaria, es uno de los países con mayores potenciales para cumplir la función de constituirse en la despensa de los alimentos que requiere la humanidad. Por tanto la actividad agrícola a más de ser la actividad económica que más aporta al PIB Total, es la segunda actividad generadora de divisas.

2.1.1. Situación en Ecuador

Clima

Por la presencia próxima de la línea ecuatorial, Ecuador tiene un clima húmedo tropical, en su mayoría con excepción de la Sierra.

Cuadro 11. Zonas o regiones climáticas en el Ecuador

Región	Cobertura %	Clima	Precipitación media anual	Temperatura media
Costa	25	Húmedo (enero – abril), se concentra el 80% de lluvia y estación seca en la segunda mitad	Costa Sur: 100 mm Guayaquil: 1.000 mm Costa Norte: 3.000 – 4.000 mm	Templadas Día: 29 - 33 ° C Noche: 20 - 24° C
Oriente	45	Tropical	3.500 – 4.000 mm	
Sierra	27	Invierno (octubre – mayo) Verano (junio – septiembre)	La precipitación anual decrece hacia el interior alcanzando valores de 300 mm inclusive	Media anual 10 y 18° C

Recursos hídricos

Ecuador cuenta con las vertientes del Pacífico y del Atlántico o Amazónica, sumando un total de 31 sistemas hidrográficos incluidas las Islas Galápagos, con 432 km³/año recursos hídricos renovables por año; la precipitación media anual es de 2.274 mm, que suponen 645 km³/año en todo el territorio continental (FAO-Forestry, 2000)

Cuadro 12. Principales vertientes hidrográficas de Ecuador

Vertiente	Principales cursos hídricos	Superficie drenada ¹ (Km ²)	Precipitación media anual (mm)	Escorrentía media anual (mm)	Evaporación media anual (mm)
Pacífico	Guayas Esmeraldas Catamayo Chira	121.279	1.543	950	593
Amazonas	Napo Santiago Pastaza	139.634	3.006	2.256	750
Islas Galápagos		8.006	600	197	403

Según el III Censo Nacional Agropecuario que se llevó a cabo en el año 2000, se reflejan los siguientes resultados:

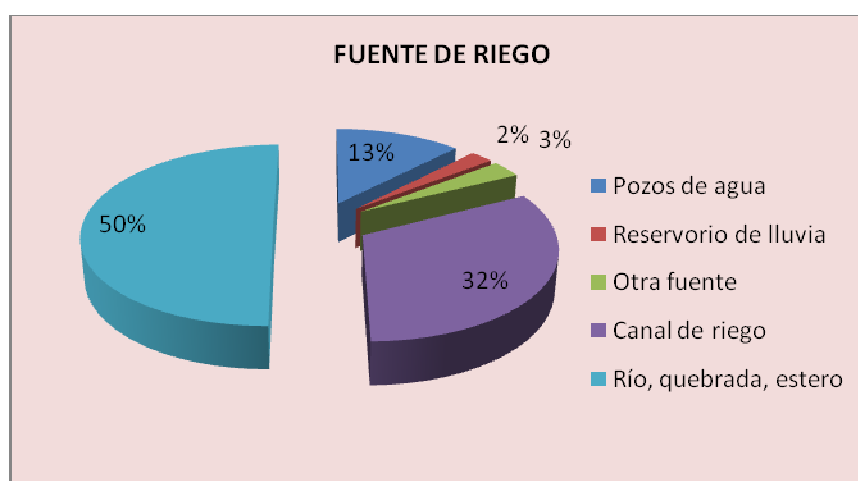


Figura 41. III Censo Agropecuario Nacional.

Fuente: <http://www.agroecuador.com/HTML/Censo/Censo.htm>

Los recursos subterráneos utilizados para el consumo doméstico e industrial de la vertiente del Pacífico se estiman en $10^4 \text{ km}^3/\text{año}$.

Más del 98% de la superficie de regadío actual, está abastecida por recursos hídricos superficiales.

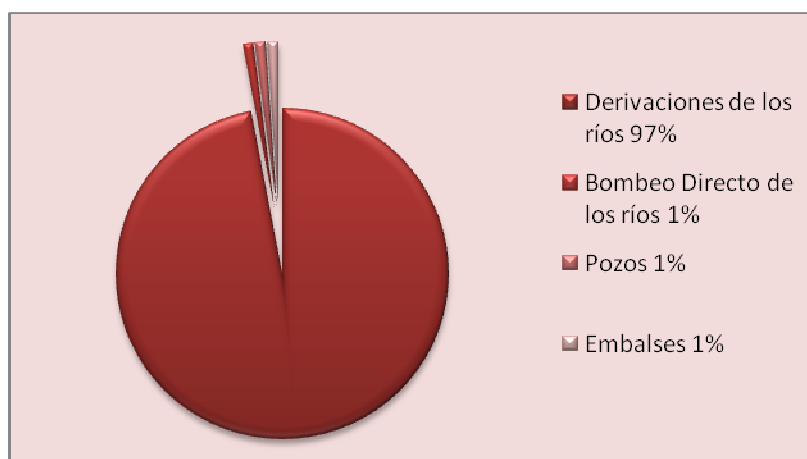


Figura 42. Origen de las aguas para riego en Ecuador (1998)

(http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/ecuador/indexesp.stm, Aquastat)

Lagos y embalses

La capacidad total de embalse de Ecuador es de 7.5 km^3 , el embalse de Daule Peripa constituye el 83% del total que abastece la costa.

Cuadro 13. Capacidad y finalidad de los principales embalses en Ecuador.

Nombre	Finalidad del embalse (106 m^3)		
	Riego	Energía	Riego, energía y otros
Daule Peripa			6.300
Poza Honda	97.5		
La Esperanza	455.0		
Pisayambo		90.0	
Agoyán		3.6	
Paute		100.0	
Tahuín	250.0		

Chongón	280'0		
Azúcar	5'0		
Los Chillos		0'3	
Guangopolo		0'13	
Cumbayá		0'36	
Total	1.087'50	194'39	6.300

Cobertura de riego

(García, 2010) manifiesta que en forma aproximada el 90% del agua que dispone el Ecuador, se destina a actividades de regadío, con una superficie de 8.500.000 hectáreas dedicadas a la agricultura, y constituye la tercera parte de la superficie nacional. Según el Consejo Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), el país cuenta con 568.000 hectáreas bajo riego. De ellas, 108.000 corresponden a riego estatal (19%) y 460.000 a riego privado (81%), que significa que el país riega el 6'68% de su superficie agrícola, y sólo se aprovecha del 15 al 25 % del recurso hídrico (Galárraga, 2001), debido a las pérdidas que se ocasionan en todo el sistema.

De las 8.000.000 hectáreas cultivadas en Ecuador, únicamente el 12% han sido implementadas por el estado, de las cuales 823.000 hectáreas se han destinado a la exportación. Suscitando un problema grande para los pequeños agricultores que tienen que buscar el recurso hídrico de una forma rudimentaria (acequias en la mayoría de los casos sin revestimiento), con la consiguiente pérdida de agua ocasionada por las filtraciones en las mismas.

Con referencia a un estudio realizado por la FAO, sobre el riego en Latinoamérica y el Caribe se observa en la figura 43 la superficie total puesta en riego y regada en el año 1997, considerando tanto el sector público como el sector privado, la misma que asciende a una superficie total de 863.370 ha.

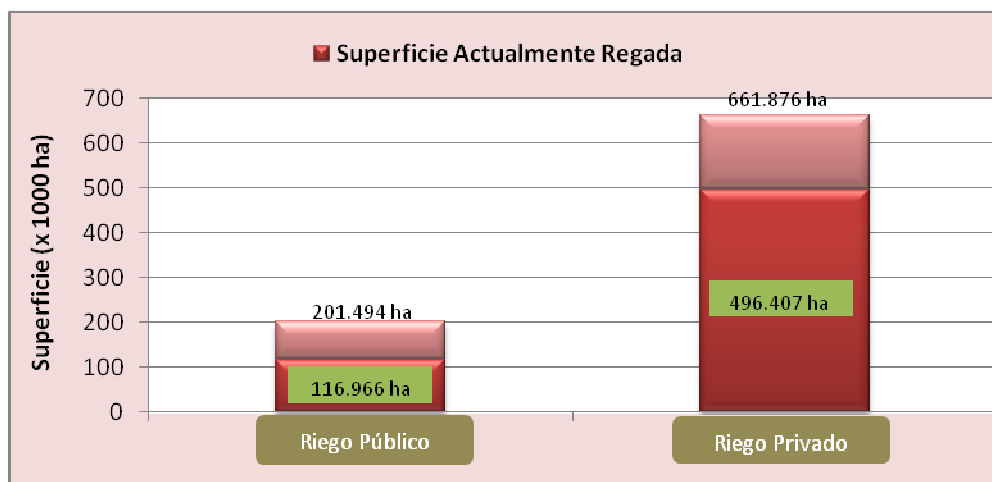


Figura 43. Superficie bajo riego y regada en el sector público y privado en Ecuador (1997).
(http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/ecuador/indexesp.stm, Aquastat)

En los sistemas de riego públicos encontramos información sistemática que consta en la figura 44, no así en el regadío privado que carece de apoyo y control para su mejora por parte del Estado por lo tanto no existen datos e información.

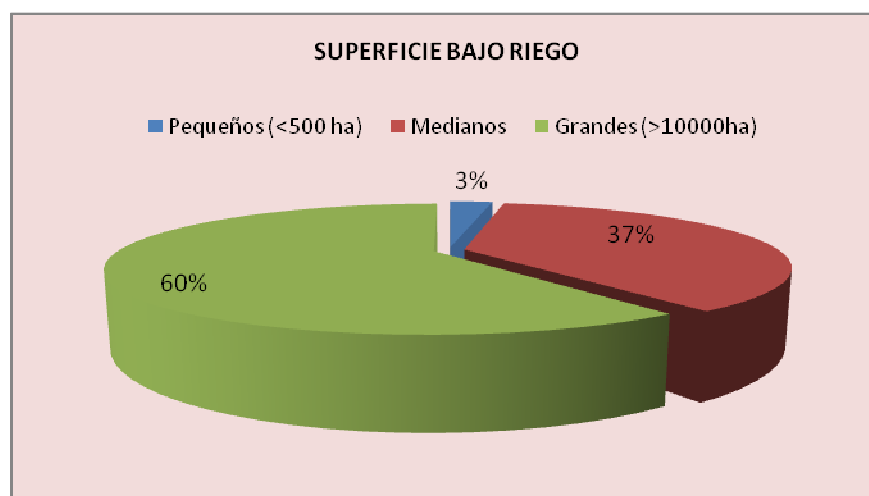


Figura 44. Distritos de riego público (DRP) en Ecuador
(http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/ecuador/indexesp.stm, Aquastat)

La operación y mantenimiento de los Distritos de Riego Público (DRP) se ha realizado por la entidad regional a la cual pertenecían, y en el año 1995 se inició la transferencia de su operación y mantenimiento a los usuarios con el apoyo del Banco Mundial. En cuanto al regadío privado, por lo general carece de operación y mantenimiento adecuados, así como también de escasos recursos para mantener el personal idóneo.

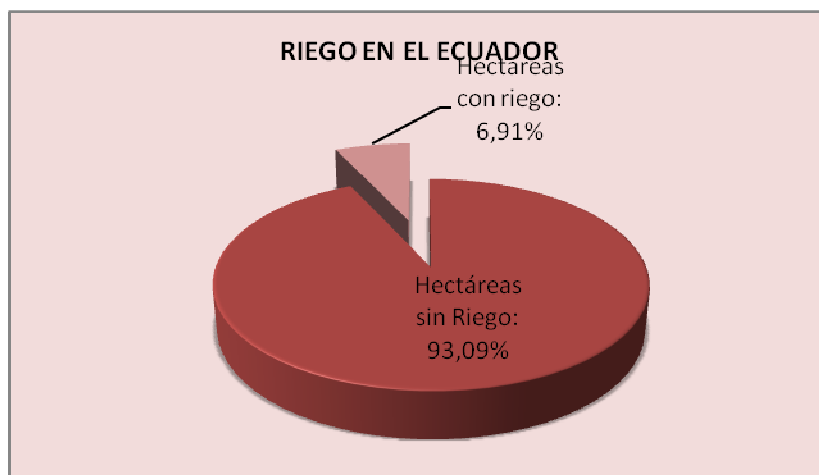


Figura 45. III Censo Agropecuario Nacional.

Fuente: <http://www.agroecuador.com/HTML/Censo/Censo.htm>

Producción.-

Ecuador es un país agrícola y ganadero no obstante su calidad de productor y exportador de petróleo. En la sierra ecuatoriana se cultiva principalmente: maíz, papa, hortalizas (cebolla, zanahoria, remolacha), trigo, cebada, alfalfa, oca, melloco, etc., y frutas de clima templado (manzana, pera, ciruela, durazno), y últimamente se ha intensificado el cultivo de flores y espárragos debido a su exportación. En la costa: banano, cacao, arroz, café, algodón, caña de azúcar, soja, palma de aceite, frutales; que son los que se exportan principalmente.

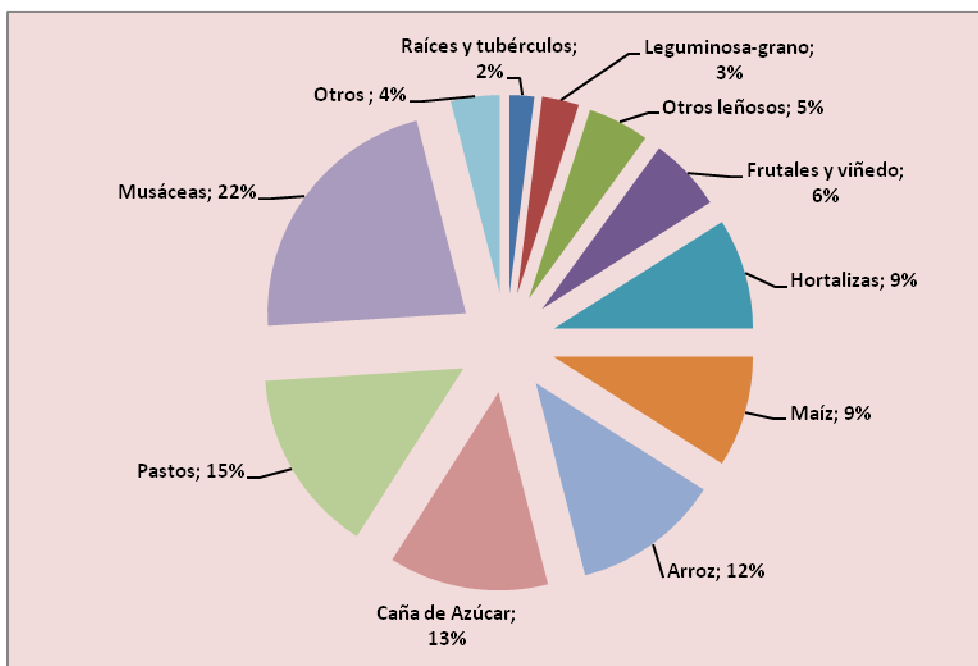


Figura 46. Cultivos en riego en los Distritos de Riego Públicos (1997)

(http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/ecuador/indexesp.stm,

Tecnología.-

Como se menciona en el presente documento, el país cuenta con el recurso hídrico suficiente y la variedad de clima permite que la producción de muchos cultivos sea excelente, entre éstos tenemos el café que representa uno de los principales productos agrícolas en Ecuador, sin embargo su producción es muy baja al compararla con otros países de Sudamérica, debido principalmente a la falta de implementación de técnicas adecuadas en el cultivo (irrigación, fertilización, uso de variedades adecuadas, forma de propagación, edad de cafetales, etc.).

Otro factor que sin duda mejoraría la producción agrícola, sería disponer de alternativas para la implementación de un sistema adecuado de recolección de datos hidrológicos y meteorológicos, que facilite el manejo y disponibilidad del recurso hídrico.

Capacidad de gestión.-

En provincias como Tungurahua, Loja, Cotopaxi, Azuay, Cañar, Imbabura, Chimborazo, Pichincha, Bolívar, Santa Elena los pobladores han formado juntas y organizaciones de

regantes que impulsan los trabajos que conllevan a la implementación de infraestructura civil y gestión del agua para riego.

Estas organizaciones se han federado para contar con representación ante los gobiernos locales, formándose así las juntas administradoras de agua potable y de riego (JAAPRE) que demandan la redistribución equitativa del agua para beneficiar la producción agrícola campesina y asegurar la soberanía alimentaria del país.

Costos.-

El costo que significa poner en funcionamiento los sistemas de riego en las regiones sierra o costa del país es variable. Según el análisis realizado por el Consejo Nacional de Recursos Hídricos en el año 1996 a 38 sistemas en operación, los sistemas menores de 500 ha tenían un costo promedio de 2.935 dólares/ ha, y 2.700 dólares/ha para sistemas entre 501 a 10.000 ha. Es necesario puntualizar que el costo por hectárea en los sistemas construidos en la región costa fluctúa entre 3.300 y 4.500 dólares/ha debido a que se usa presas de embalse para su operación.

Con respecto a las tarifas de riego privado son muy variables y éstas financian el salario del operador y los costos de operación y mantenimiento; que son cubiertos en muchas ocasiones por la mano de obra de los usuarios y por una cantidad que se fija por hectárea y usuario.

A la hora de hablar de economía, el rubro selección de tuberías dentro de un sistema presurizado constituye uno de los elementos en donde la inversión es significativa e importante se trate de abastecimiento o en el caso específico de riego, por lo tanto es necesario evitar costos excesivos en la selección de sus diámetros a través de algoritmos de optimización.

Zonas críticas.-

La escasez de agua es inquietante en las provincias de Loja, la costa de Manabí, la parte occidental de la península de Santa Elena en Guayas y partes de las provincias de Cotopaxi, Tungurahua y Chimborazo ubicadas en la cuenca alta del río Pastaza. Los

niveles de precipitación son en general bajos, con una escasa capacidad de regulación anual del agua disponible; lo que obliga a buscar alternativas que nos permitan optimizar el uso del recurso hídrico y métodos innovadores para el monitoreo y efectividad del regadío.

Entorno institucional.-

En el año de 1994 se crea el Consejo Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), responsable de planificar y dictar políticas sobre los recursos hídricos en el ámbito nacional. Se crearon también organismos regionales, administrativa y económicamente autónomos, con el objeto de transferir las funciones que antiguamente realizaba el INERHI (Instituto Ecuatoriano de Recursos Hidráulicos).

El 27 de mayo del 2008, entra en vigencia la SENAGUA (Secretaría Nacional del Agua), organismo gubernamental con la finalidad de conducir y regir los procesos de gestión de los recursos hídricos nacionales de manera integrada y sustentable en los ámbitos de cuencas hidrográficas. No obstante toda esta organización, continuamos con deficiencia en la capacidad institucional debido principalmente a la inestabilidad de los niveles de dirección, problemas financieros, desarticulada capacidad institucional, falta de coordinación de los organismos que se encuentran manejando el recurso hídrico, carencia de personal idóneo y existencia mínima de operación y mantenimiento de los sistemas de recursos hídricos, especialmente en el sector riego. (Galárraga, 2001)

2.1.2. Riego en la Provincia de Loja

De acuerdo al censo del año 1990 la mayor parte de las concesiones de agua otorgadas por el INERHI hasta junio de 1992, se totalizan 12'176 l/s que corresponden al riego a cargo del sector privado constituyendo el 93%. Para mayor comprensión sobre la distribución de caudales de ríos y tributarios, se elaboró un esquema topológico en el que se detalla la distribución espacial de las concesiones.

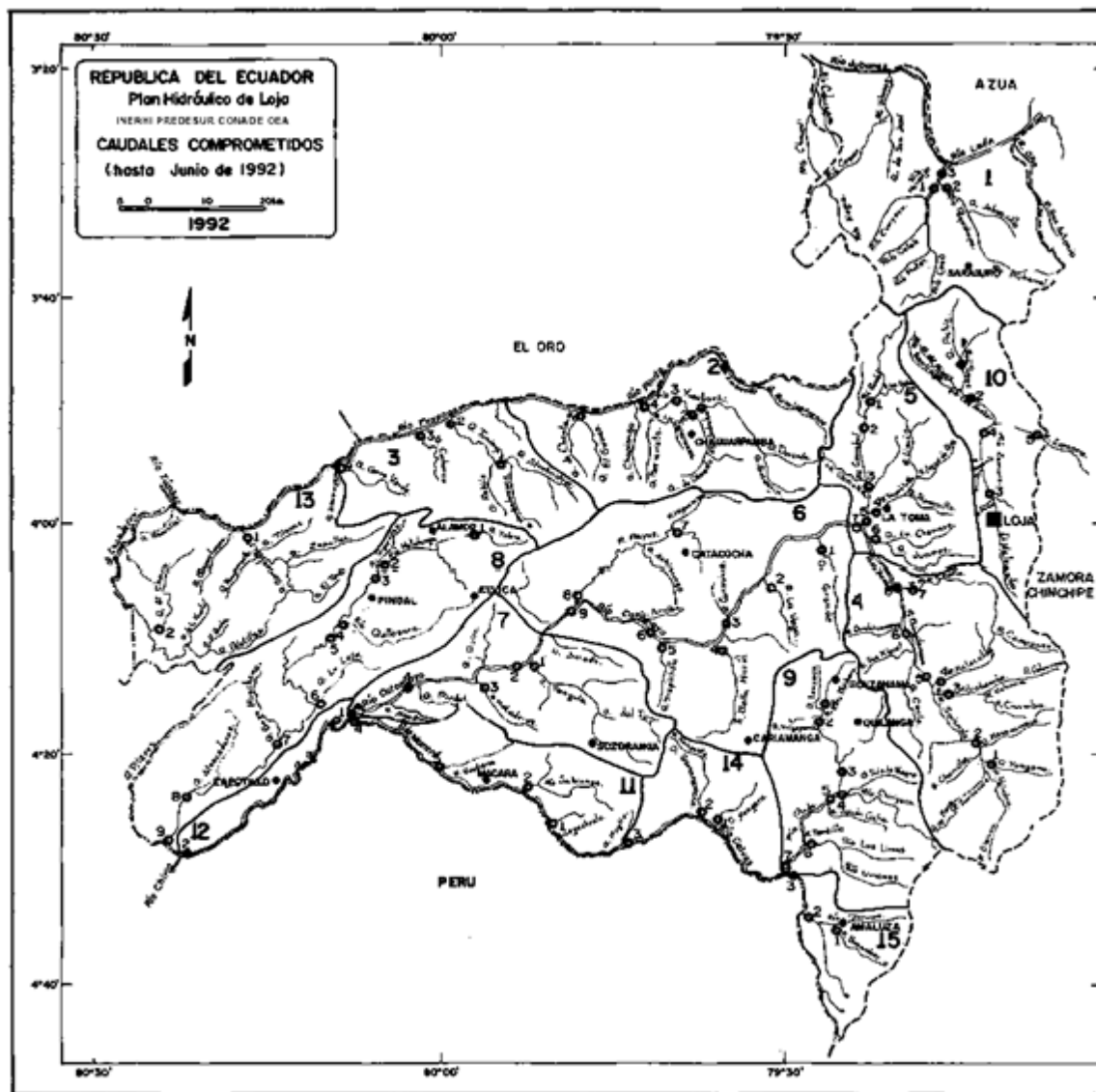


Figura 47. Distribución espacial de las cuencas.

En el siguiente cuadro se sintetizan, los caudales concedidos por el INERHI a nivel de cuencas hasta junio de 1992, tanto para los proyectos de riego a cargo del sector privado, como fines de uso doméstico.

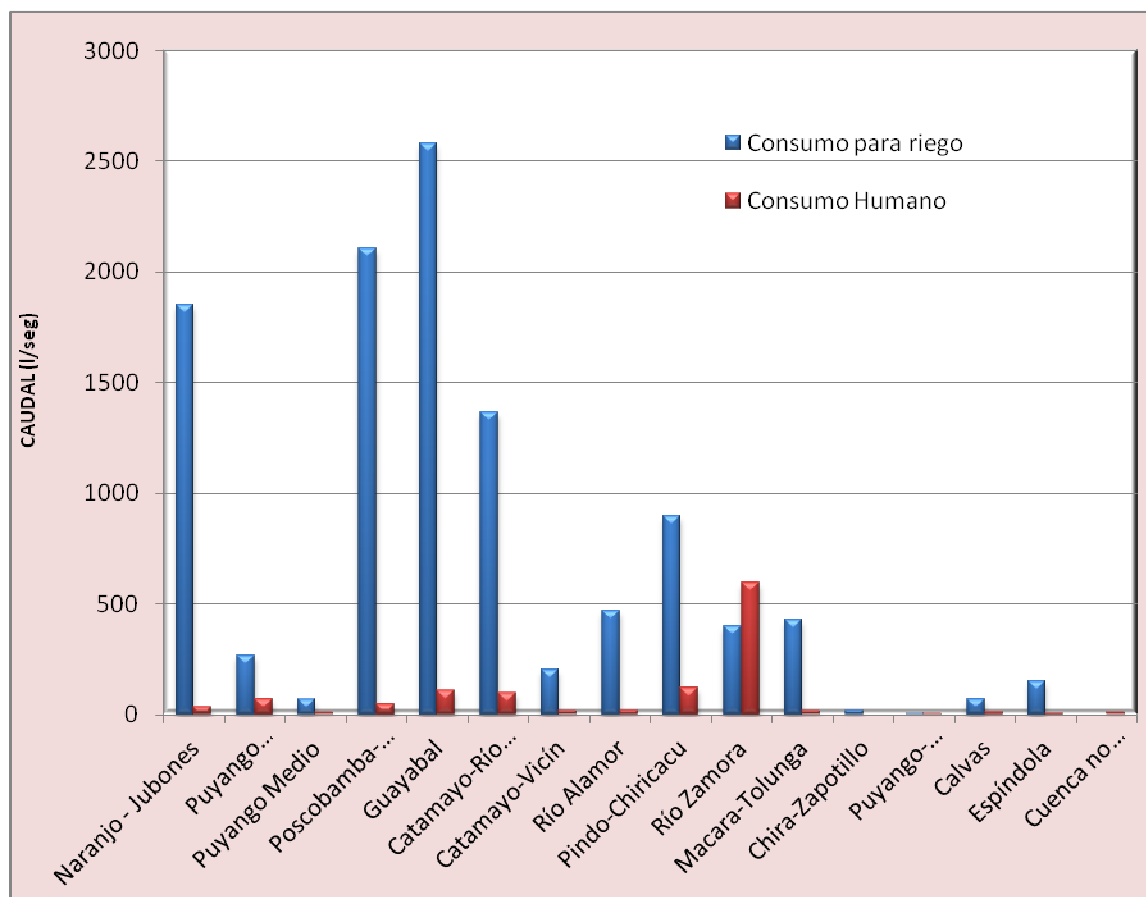


Figura 48. Caudales en Cuencas de Loja.

Se entenderá por riego estatal a aquel donde ha intervenido el Estado, básicamente a través de instituciones como INERHI y en ciertos casos la Subcomisión Ecuatoriana-PREDESUR, en las fases de construcción y operación de los mismos.

Cuadro 14. PROYECTOS DE RIEGO DEL INERHI

NOMBRE	FUENTE DE CAPTACION	COTA DE	INERHI	CAUDAL CAPTADO

		CAPTACION (m)				m³/s
			MICROCUENCA	SUBCUENCA	CUENCA	
TABLON OÑA	R. OÑA	2.503	R. CARCAY Y DREN R. LEON	R. LEON	R. JUBONES	1'00
LA PAPAYA	R. LLACO	2.485	R. NARANJO	R. LEON	R. JUBONES	1'00
PAQUISHAPA	R. RAMAS	2.560	Q. GULLARPUGRO	R. LEON	R. JUBONES	1'00
CHUCCHUCCHIR	R. SININCAPAC	2.630		R. LEON	R. JUBONES	0'30
LA ERA	Q. SAN AGUSTIN	1.660	R. SOLANDA	R. CATAMAYO	R. CATAMAYO	0'35
QUINARA	R. MASANAMACA	1.679	R. MASANAMACA- DREN PISC.	R. CATAMAYO	R. CATAMAYO	0'40
VILCABAMBA	R. CHAMBA	1.638	R. VILCABAMBA	R. CATAMAYO	R. CATAMAYO	0'50
EL INGENIO	R. CHIRIYACU	1.247	R. PINDO Y R. CALVAS	R. MACARA	R. CATAMAYO	0'80
MACARA	R. MACARA	515	Q. RAMADA AL R. MACARA	R. MACARA	R. CATAMAYO	2'00
CAMPANA- MALACATOS	R. CAMPANA	1.745	R. SOLANDA	R. CATAMAYO	R. CATAMAYO	0'90
GUAPALAS	R. MATALANGA	920	Q. LA CORRERA Y DREN	R. ALAMOR	R. CATAMAYO	0'40
JORUPE-CANGO- CHARA	R. LIMONES Y R. JORUPE	1.600	R. JORUPE	R. MACARA	R. CATAMAYO	0'50
SANAMBAY- JIMBURA	R. BERMEJO	1.600	R. BERMEJO Y DREN. R. ESP.	R. MACARA	R. CATAMAYO	0'20
CHIRIYACU- LUCERO	R. CHIRIYACU	1.250	R. PINDO	R. MACARA	R. CATAMAYO	2'00
AIRO-FLORIDA	R. AIRO	1.580		R. MACARA	R. CATAMAYO	0'30
SANTIAGO	R. SANTIAGO	2.480	NO SE HA DIVIDIDO	NO SE HA DIVIDIDO	R. SANTIAGO	1'20

En la gráfica se observa la inversión que se ha realizado en actividades de riego en la Provincia de Loja, desglosada por cantones y actualizada en el año 2011.

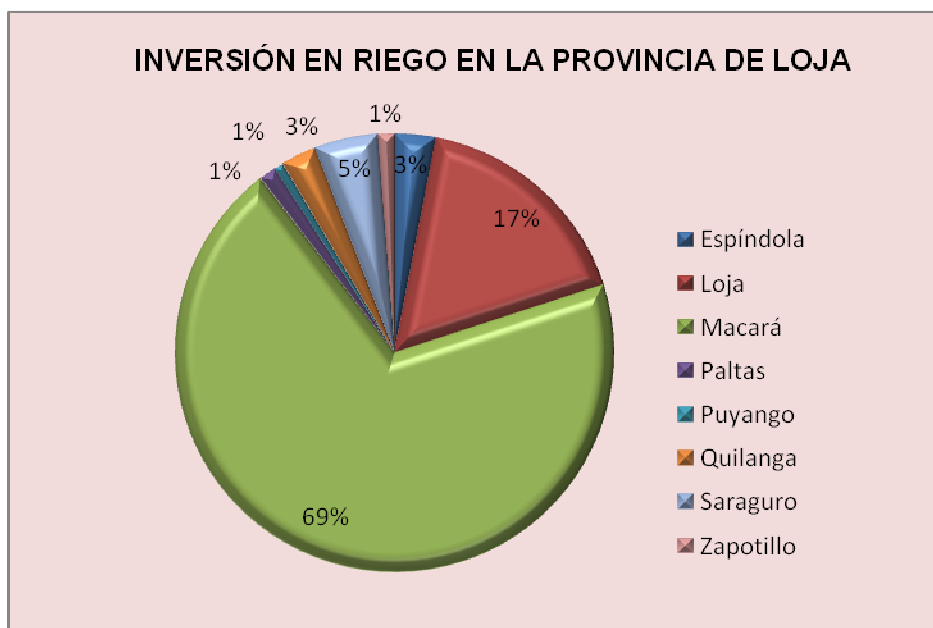


Figura 49. Porcentaje de inversión en riego en la Provincia de Loja (RIDRENSUR – LOJA, 2011)

El sistema de riego más generalizado es por gravedad, los agricultores no utilizan el riego por aspersión o afines, de tal manera que la modalidad es llegar con agua a surcos casi perpendiculares a las curvas de nivel sobre todo cuando la pendiente del suelo es significativamente fuerte, produciendo cárcavas y erosión al terreno.

3. MATERIALES Y MONITOREO:

3.1 Instrumental usado

Como parte del instrumenta usado para el monitoreo de la parcela demostrativa contamos con:

3.1.1 Sistema de adquisición de datos (SAD)

El equipo de control de variables está integrado por:

Cuadro 15. Elementos equipo control de variables

Ítem	Cant.	Dispositivo	Modelo-Marca
1	1	Kobold MIK Series Magneto-Inductive Flow Meter	MIK-5NAU1PL443
2	2	AST4100 OEM Compact Pressure Sensor	AST4100-A-00100-P-4-A-0-000
3	1	GF Signet 2537 Paddlewheel Flow Meter	3-2537-6C-P0
4	1	Datalogger 4 canales externos de corriente	U12-006
5	1	Tablero Beacoup 30x30 cm	NA
6	1	UPS	ST-2406-2AQ

3.1.2 Estación de ensayos

La estación de ensayos que se ha implementado está conformada por emisores (aspersores, micro-aspersores y goteros) distribuidos en diferentes líneas.

3.2 Monitoreo de parcela

Para realizar el monitoreo de la red se ha implementado las siguientes subunidades:

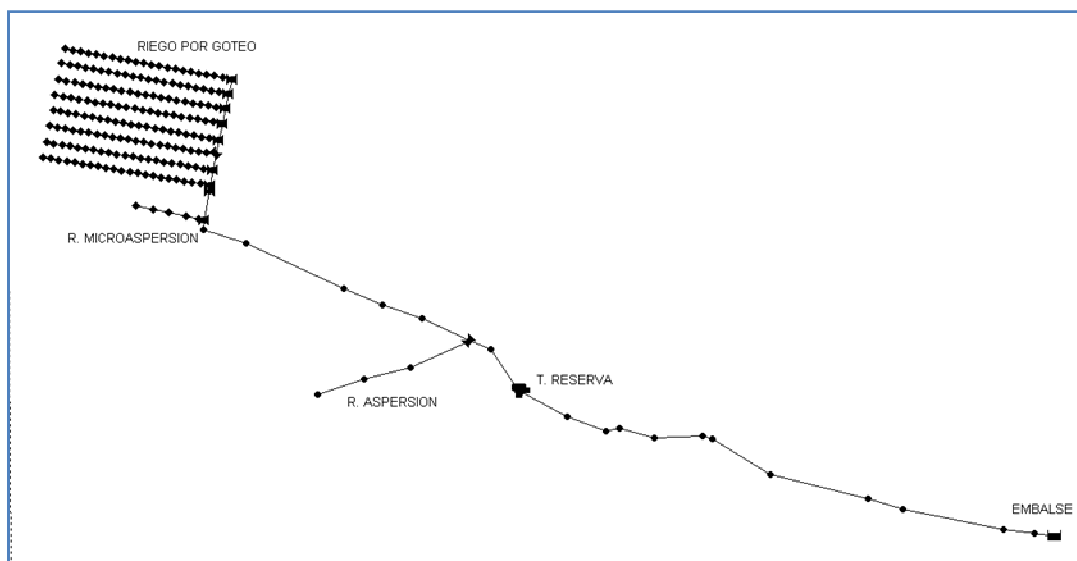


Figura 50. Granja experimental

Subunidad de riego 1: la misma que está formada por 8 subramales, con una longitud de 44'62 m cada una.

Subunidad de riego 2: contiene una línea con 5 micro-aspersores ubicados en una longitud de 18 m.

Subunidad de riego 3: provista de una línea con 3 aspersores, de longitud 40 m

a. Selección de emisores:

Luego de analizar las variables agronómicas se ha definido los siguientes tipos de emisores:

Para goteros:

Se seleccionó el GOTERO DRIPNET PC 12250 que permite el riego uniforme de las plantas según lo requerido.



Figura 51. Alimentación de líneas de goteo

Cuadro 16. Clasificación de goteros usados en campo.

GOTERO	DIAMETRO mm	RANGO DE PRESIÓN Bar	ESPACIO GOTERO m	CAUDAL l/h	PRESIÓN ENTRADA Bar	LARGO MÁXIMO DE LATERAL m
DRIPNET PC 12250	12	0'4 – 2'5	0'20	1'0	2'00	85
DRIPNET PC 12250	12	0'4 – 2'5	0'20	1'6	2'00	63
DRIPNET PC 12250	12	0'4 – 2'5	0'30	1'6	2'00	90
DRIPNET PC 12250	12	0'4 – 2'5	0'40	1'6	2'00	116
DRIPNET PC 16150	16	0'4 – 2'5	0'40	0'6	1'60	224
DRIPNET PC 16150	16	0'4 – 2'5	0'30	1'6	1'60	164
DRIPNET PC 16250	16	0'4 – 2'5	0'40	1'6	1'60	210
DRIPNET PC AS 16250*	16	0'4 – 2'5	0'40	1'0	2'00	286
DRIPNET PC 16350	16	0'4 – 2'5	0'30	1'6	2'4	146

Cada cinta de gotero está provista de 9 emisores de este tipo, que suman un caudal total de 14'4 l/h en el subramal.

Para microaspersores:

Se ha instalado el modelo 250 MICROASPERSOR GyroNet LR.

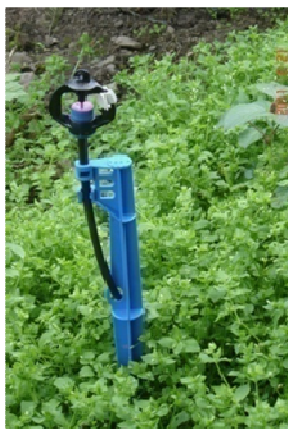


Figura 52.Microaspersor

En el mercado es posible encontrar diversos modelos de micro-aspersores como consta:

Cuadro 17. Tipos de microaspersores

C	CODIGO DE COLOR	DIAM° DE BOQUILLA MM	PRESIÓN bar	CAUDAL L/H	φ regado (m)* Rotor LBR	φ regado (m)* Rotor LBR	Color del rotor LR
027	Marrón	0'75	1'5	26	5'0	0'7	Violeta
			2'0	20			
			3'0	36			
040	Azul	0'90	1'5	38	6'0	0'7	Violeta
			2'0	44			
			3'0	54			
058	Gris	1'10	1'5	51	7'5	0'7	Negro
			2'0	59			
			3'0	72			
070	Negro	1'20	1'5	68	7'5	1'0	Negro
			2'0	78			
			3'0	96			
090	Naranja	1'40	1'5	90	8'5	1'0	Negro
			2'0	104			
			3'0	128			
120	Rojo	1'57	1'5	116	8'5	NR	Negro
			2'0	134			
			3'0	165			
150	Celeste	1'77	1'5	132	NR	NR	NR
			2'0	152			
			2'5	170			
200	Amarillo	2'04	1'5	196	NR	NR	NR
			2'0	226			
			2'5	253			
250	Violeta	2'28	1'5	247	NR	NR	NR
			2'0	285			
			2'5	319			
300	Verde	2'48	1'5	292	NR	NR	NR
			2'0	337			
			2'5	377			

Para aspersion:

En la línea de aspersión se ha colocado el ASPERSOR NAAN 5022



Figura 53. Aspersor

En el cuadro siguiente, se encuentran algunas clases de aspersores que existen en el mercado, con sus respectivas especificaciones técnicas.

Cuadro 18. Tipos de aspersores

BOQUILLA mm	PRESIÓN BAR	Q1 m3/h	Q2 m3/h	DIÁMETRO m
2'8 x 2'5 ANARANJADA	2'0	0'45	0'73	21'0
	3'0	0'55	0'90	22'5
	4'0	0'63	1'03	23'0
3'2 x 2'5 VERDE	2'0	0'57	0'85	22'0
	3'0	0'70	1'05	23'0
	4'0	0'81	1'21	24'5
3'2 x 2'5 AZUL	2'0	0'66	0'94	23'0
	3'0	0'81	1'16	24'0
	4'0	0'93	1'33	25'0

Disposición:

Las cintas de goteros se han colocado sobre el nivel del suelo, cada cinta está dispuesta para dos plantas; siendo 1.252'33 m² la superficie total de riego, provista de 8 líneas con 336 puntos de demanda.

Las conexiones entre las líneas de goteros, microaspersores y aspersores se realizan a través de tuberías laterales y sus respectivos accesorios.

b. Elementos del sistema de riego instalado:

Enumeraremos seguidamente los componentes del sistema de riego presurizado que se encuentran instalados en la parcela demostrativa.

Cuadro 19. Elementos sistema de riego.

Cantidad	Descripción
1	Tanque de reserva de 1.500 l
1	Bomba de 1 hp
2	Filtros de anillas de ¾"
1	Válvula de aire de ¾"
2	Válvula de compuerta de 1"
1	Válvula reductora de presión de 1" con reducción a 2'5 bar
8	Válvulas de corte de 16 mm de diámetro
5	Manómetros
7	Medidores analógicos de volumen

Tanque de reserva



Figura 54. Tanque de reserva de 1.500 l.

Con capacidad de 1.500 litros, es el depósito que se ha usado para proporcionar la demanda de agua suficiente con el objetivo de facilitar el riego en la parcela.

Bomba

Para dotar de la presión necesaria en cada emisor instalado en la parcela, se implementó una bomba con las siguientes características:

Modelo: CPM 620		
Potencia	1	HP
H _{máx}	35	m
H _{mín}	19	m
f	60	Hz
Intensidad	12	A
VL	250	V



Figura 55. Bomba 1 hp

La curva característica del modelo de la bomba corresponde a las siguientes especificaciones:

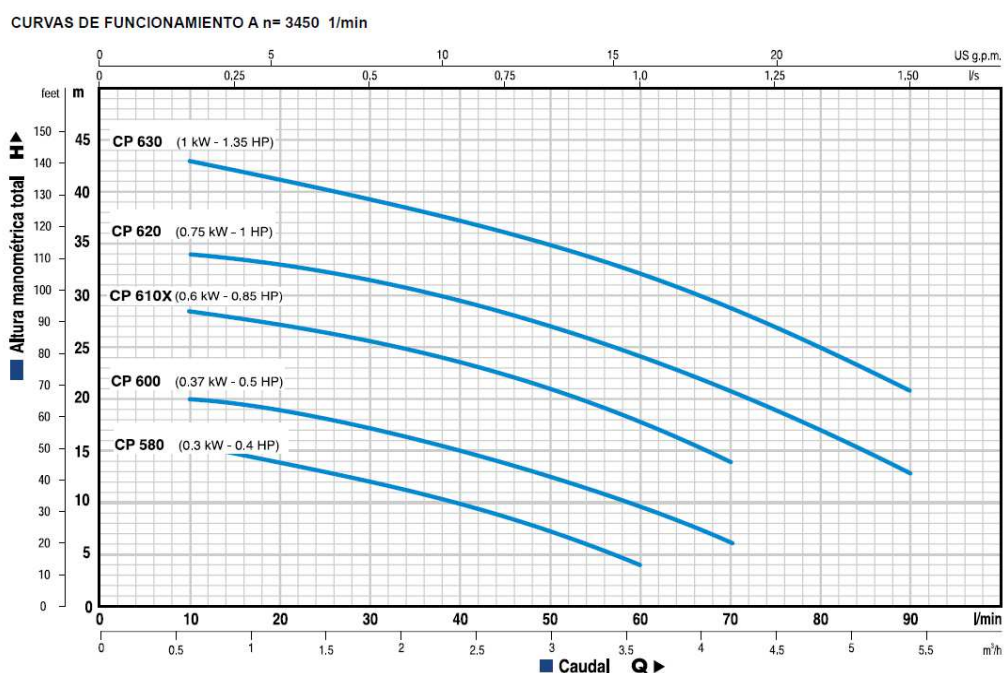


Figura 56. Especificaciones técnicas de la bomba de 1 hp, casa comercial

Cuadro 20. Funcionamiento de bombas.

MODELO BOMBA		POTENCIA		m3/h	0	0'6	1'2	1'8	2'4	3'0	3'6	4'2	
					l/s	0'167	0'333	0'500	0'667	0'833	1'00	1'167	
				l/mi n	0	10	20	30	40	50	60	70	
CPm 580	CP 580	0'30	0'40	H m	17'5	15'5	14	12	10	7	4		
CPm 600	CP 600	0'37	0'50		21'5	20	19	17	15	12'5	9'5	6	
CPm 610x	CP 610X	0'60	0'85		30	26'5	27	25'5	23'5	21	17'5	14	
CPm 620	CP 620	0'75	1		35	34	33	31'5	29'5	27	24	20'5	
CPm 530	CP 630	1	1'35	45	43	41	39	37	35	32	29		

Filtro de anillas



Figura 57. Filtro de Anillas

La función primordial de este dispositivo es evitar la obstrucción de los emisores que se encuentran ubicados en las redes, garantizando el correcto funcionamiento del sistema de riego presurizado.

Los filtros se han ubicado uno en el punto de inyección de los fertilizantes y otro antes del tanque de reserva.

Cuadro 21. Tipos de filtros que disponemos en el mercado, proporcionada por una de las casas fabricante.

FILTROS	FILTRADO MESH	CAUDAL FILTRADO m ³ /h
¾" ANILLOS	120	4
1" ANILLOS	120	6
1 ½" ANILLOS	120	8
2" ANILLOS	120	25
3" ANILLOS	120	40

Se ha escogido el filtro mecánico de anillas, con las siguientes especificaciones:



Figura 58. Filtro de Anillas estructura interna

Cuadro 22. Características del filtro escogido

Catálogo el riego

<http://anillas.elregante.com/>

Presión máxima	10 bar
Caudal	6 m ³ /h
Superficie de filtrado	308 cm ²
Volumen de filtrado	440 cm ³
Longitud del filtro	237 mm
Peso	1'0 kg
Ancho del filtro	158 mm
Distancia entre acoplamientos finales	158 mm
Grado de filtración	430 – 130 u

Este filtro contiene en su interior anillas, con un cilindro o cartucho en la misma orientación y compacta las mismas, con lo cual se crea un entrelazado con una luz de paso determinado por su cruce; por donde quedan retenidas las partículas en suspensión; son utilizados como único filtro para caudales inferiores a $5'7 \text{ m}^3/\text{hora}$.

En los filtros manuales el paquete de anillas se ensucia durante el proceso de filtrado y será necesario abrir el filtro, desmontar las anillas y limpiarlas manualmente. En el filtro automático los cartuchos de anillas se comprimen a través de un pistón o electroválvula, con el proceso de filtrado se crea una pérdida de carga entre la entrada y salida del filtro que se detecta por medio de un presostato; diferencial que proporciona la señal para iniciar el proceso de lavado automático.

La elección de uno u otro estará en función de:

- Si existe gran cantidad de materia en suspensión del agua a filtrar y se necesita limpiar el filtro antes de terminar un turno de riego, se usará un filtro automático.
- Es conveniente instalar filtros automáticos cuando los sistemas de riego trasiegan grandes caudales y se requiere instalar muchos filtros; lo que ocasiona una limpieza manual muy laboriosa.

El tamaño de partículas que es capaz de retener un filtro de anillas se representa por el número de Mesh, que es el número de poros existente en una pulgada lineal, o por el número de luces que se formen para un micraje especificado en el área de la sección exterior del cartucho de anillas. Según catálogo de casa comercial el filtro usado en nuestro caso producirá las siguientes pérdidas:

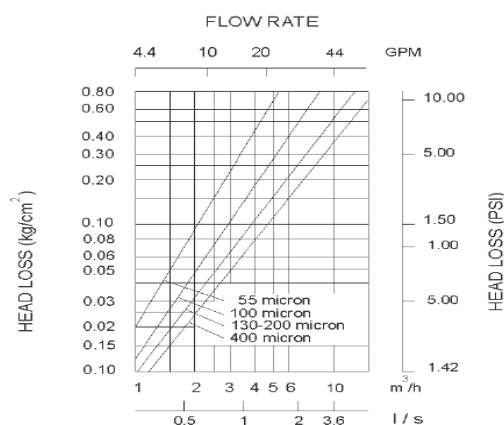


Figura 59. Pérdidas del filtro de anillas

Por lo tanto la pérdida que se estipula en este caso es de $0'15 \text{ kg/cm}^2$, su limpieza se realiza desmontando el equipo; es decir abriendo la carcasa, extrayendo las anillas y lavándolas con agua a presión y con un cepillo, existe la posibilidad de automatizar la limpieza mediante sistemas de contralavado.

Válvula de aire



Figura 60. Válvula de aire

En un sistema de riego es indispensable colocar este tipo de válvulas para evitar la formación de burbujas de aire, con el objeto de impedir daños en el equipo y problemas de su rendimiento.

En la parcela de estudio se instaló este accesorio luego de la bomba para permitir el uso adecuado de la bomba en el momento preciso de su encendido y apagado y con el objeto de evacuar las bolsas de aire durante el funcionamiento del sistema de riego.

Su especificación técnica consta como: válvula plástica de aire BVK, doble acción: aire y vacío, diámetro: $\frac{3}{4}$ "

Válvula de corte



Figura 61. Válvulas de Corte

Cumple la función de permitir el paso de fluido hacia los lugares que tenemos previsto realizar el riego, su unión es roscable tipo NPT 100% hermética, permite trasegar el caudal reduciendo la pérdida de carga hidráulica, en medidas desde 1/2" a 2" HI y presión máxima de 10 atm. En la parcela demostrativa se han colocado tres tipos de válvulas de compuerta o de paso:

- 3 de diámetro de 1", ubicadas: 1 en la parte inicial, luego del tanque de reserva y 2 para controlar el paso del flujo a las líneas de los aspersores y goteros correspondientemente.
- 1 Válvula de corte de diámetro de 16mm para controlar el flujo a la red de microaspersores.
- 8 Válvulas de corte que permiten el paso del fluido a las redes de goteros.

Para realizar el cálculo hidráulico se asume las pérdidas localizadas siguientes:

Cuadro 23. Pérdidas en válvulas

Tipo de singularidad	K
Válvula de compuerta totalmente abierta	0'2
Válvula de compuerta totalmente abierta	5'6
Curva de 90°	1'0
Curva de 45°	0'4
Válvula de pie	2'5
Emboque (entrada en la tubería)	0'5
Salida de la tubería	1'0
Ensanchamiento brusco	$(1-(D1/D2)^2)^2$

Reducción brusca de sección (contracción)	$0.5(1-(D1/D2)^2)^2$
---	----------------------

Válvula reductora de presión



Figura 62. Válvula Reductora de Presión

Su función es reducir la presión aguas debajo de la misma, hasta un valor prefijado en nuestro caso de 5 bares, se instaló a la entrada de la parcela de goteros.

Es operada hidráulicamente con activador y cierre de diafragma plano o con fuelle, de diseño en línea y paso directo. Por su diseño autónomo, no necesita una línea de detección externa aguas abajo para funcionar. Está diseñada para caudales bajos a moderados. La precisión de la válvula reductora de presión de acción directa es normalmente del +/- 10% del punto de ajuste aguas abajo.

Manómetros

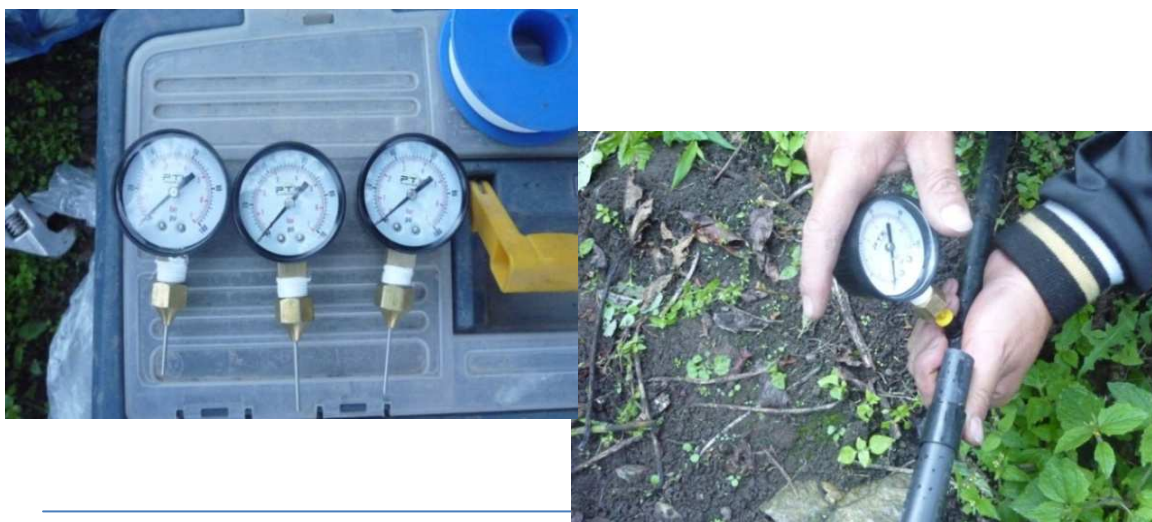


Figura 63. Manómetros

Con el objeto de disponer de nudos de presión, hemos colocado en cada uno de las líneas de goteo, manómetros analógicos.

Este dispositivo tiene partes mecánicas con carátula de escala graduada y a través de un puntero indica la presión.

Cuadro 24. Especificaciones de manómetros

Precisión	0'5
Rangos	Vacío – 2.000 bar
Diámetros	40 mm – 250 mm
Sensor tubo Bordon o Fuelle	
Líquido antivibraciones	

Contadores y caudalímetros





Figura 64. Contadores

Los caudalímetros miden caudal instantáneo, con estos dispositivos es posible totalizar el volumen del flujo que circula pero no es su función principal.

Los contadores acumulan volumen, pueden usarse para facturar el consumo de agua y obtener el caudal instantáneo, se colocan en línea con la tubería que transporta el fluido.



Figura 65. Clasificación de dispositivos para medir gasto másico en fluidos (Apuntes de la Asignatura de Gestión de Abastecimientos – 2010)

Para el monitoreo en parcela se ha empleado contadores de chorro único y sensores de caudal y presión.

Los contadores de chorro único, se enmarcan dentro de la categoría de medidores de velocidad. Su funcionamiento se basa en la incidencia tangencial de un chorro de agua sobre la turbina alojada en el interior de la carcasa que está fabricada en latón o bronce, transforma la velocidad lineal del flujo en movimiento rotacional, sus dimensiones son críticas para su exactitud, con tolerancias bajas para su fabricación. La velocidad de giro

de la turbina es directamente proporcional a la velocidad de impacto del agua sobre la misma y por tanto, del caudal circulante. (Arregui et al. 2007)

La base de la cámara de medición (donde se encuentra la turbina) puede ser lisa o con nervios, cuya función es la de provocar un régimen turbulento a caudales bajos, permitiendo que la curva de error se mantenga dentro los límites permisibles.

La curva de error del contador representa el error de medición en % que presenta un contador para cada valor de caudal que circula por el mismo, el error de medición global de un contador es la diferencia entre el volumen contabilizado por éste y el realmente consumido, y se calcula ponderando el error que se produce en cada valor de caudal de consumo con el porcentaje de volumen que el cliente usa en ese mismo valor. Por tanto, el error de medición global de un contador depende tanto de su curva de error como de la forma en que se utiliza el agua.

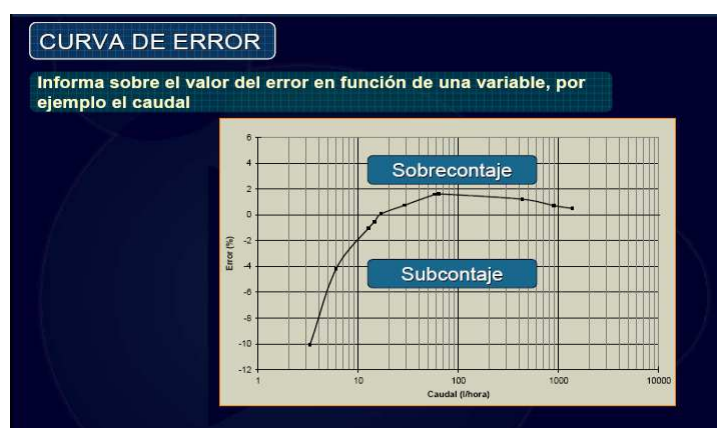


Figura 66. Curva de error (Apuntes de la Asignatura de Gestión de Abastecimientos – 2010)

La pérdida de carga se adopta del gráfico que corresponde a un contador de ½” con caudal hasta 4 m³/hora

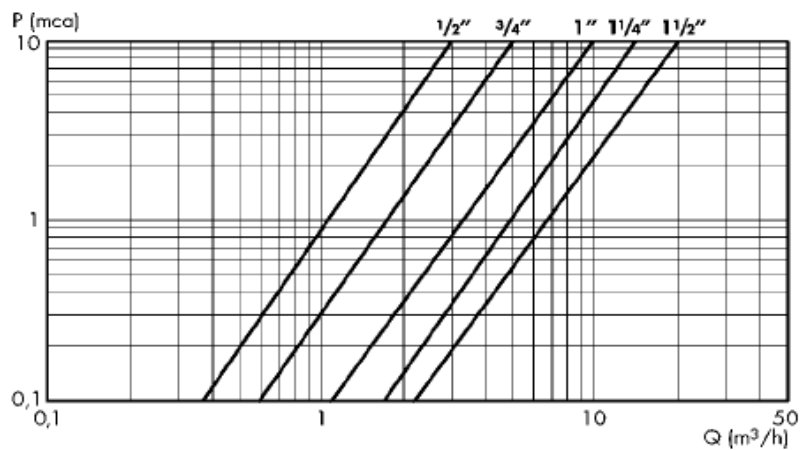


Figura 67. Pérdida de carga en contadores (<http://www.regaber.com>)

c. Implementación de sistema de adquisición de datos



Figura 68. Tablero de control de caudalímetros y manómetros electrónicos

Para la recopilación de datos, se implementará un sistema de adquisición de datos que consta de los siguientes elementos.

Cuadro 25. Elementos Sistema de Adquisición de Datos (SAD)

	Unidad	Cantidad
Módulo de Adquisición de datos:		
Caja de 30*30	U	1
DataLogger de 4 canales, 4-20mA + software, alimentación 12 V (El HOBO U12-012)	U	1
Batería 12 V	U	1
Cargador de batería, 12V, 2A	U	1
Sensor de presión (16mm) 5/8 pulgadas. Salida 4-20mA	U	2
Sensor de caudal (16mm) 5/8 pulgadas. Salida 4-20mA	U	2
Accesorios	GLOB.	1

Obtenemos valores de las variables: caudal, y presión que se tabularán para la simulación posterior de la red en EPANET, además se determinará el coeficiente de uniformidad de riego, así como las presiones de servicio de los diferentes emisores instalados en el área de riego.



Figura 69. Tablero de control de variables hidráulicas

Las campañas de toma de datos se realizaron en los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre; los datos se adjuntan en los anexos.

El HOBO U12-012 acepta una amplia gama de sensores de la energía y el medio ambiente. Ofrece resolución de 12 bits, medidos para la detección de mayor variabilidad en los datos registrados y medidos, gran cantidad de memoria a largo plazo o despliegues rápidos, botón programable de inicio, interfaz directa USB para la descarga rápida de datos.

Cuadro 26. Especificaciones del HOBO U12-012

Serie medición	Canales de entrada externa (ver manual sensor) 0 a 2'5 VDC' 0-5 VDC (con CABLE-ADAP5) y de 0 a 10 VDC (con CABLE-ADAP10)
Precisión (registrador solamente)	$\pm 2 \text{ mV} \pm 2'5\%$ de la lectura absoluta $\pm 2 \text{ mV} \pm 1\%$ de la lectura de registrador de potencia - sensores
Resolución	0'6 mV
Precisión del tiempo	± 1 minuto por mes a 25 ° C (77 ° F)' consulte Parcela A
Rango de Operación	-20 a 70 ° C (-4 ° a 158 ° F)
Rango de Temperatura	Registro: -20 ° a 70 ° C (-4 ° a 158 ° F) Lanzamiento / lectura: 0 ° a 50 ° C (32 ° a 122 ° F) por la especificación USB
Rango de humedad	0 a 95% RH' sin condensación
Vida de la batería	1 año de uso típico
Memoria	64 K bytes(43.000 mediciones de 12-bit)
Peso	46 g (1'6 oz)
Dimensiones	58 x 74 x 22 mm (2'3 x 2'9 x 0'9 pulgadas)

SENSOR DE PRESION



Figura 70. Caudalímetro y manómetros electrónicos

Compactor AST4100, sensor de presión aislado de acero inoxidable, compatible con una amplia gama de líquidos y gases en los rangos de presión hasta 10.000 psi, están disponibles con potencias de 10 mV/ V.

Beneficios

- De alta resistencia, construcción de acero inoxidable

- Sin aceite, soldaduras o aros interno
- Una pieza de elemento sensor
- Intervalo amplio de temperaturas
- Rangos de hasta 10.000 psi
- Baja errores estáticos y térmicos
- Compatible con una amplia gama de líquidos y gases
- UL / cUL 508 Aprobado.

Aplicaciones

- Equipos de prueba
- Paneles de control
- Sistemas hidráulicos
- Registradores de datos
- Equipos HVAC / R
- Neumática
- Almacenamiento de Hidrógeno (316L)

Datos eléctricos

Salida	4-20mA	1-5VDC, 1-6VDC	0-50mV (10 mV / V)	0.5-4.5V Proporcional
Excitación	10-28VDC	10-28VDC	5VDC típico	5VDC típico, regulado
Impedancia de salida	> 10k Ohm	<100 Ohms	1100 Ohm nominal	<100 Ohm, nominal
Consumo de Corriente	20 mA, típico	<10mA	<5mA	<10mA
Ancho de banda	(-3dB): DC a 250 Hz	(-3dB): DC a 1 kHz	(-3 dB): DC a 5 kHz,	(-3dB): DC a 1 kHz
Ruido de salida	-	<2 mV RMS	min	<2 mV RMS
Compensación del cero	<± 1% de FS	<± 1% de FS	-	<± 1% de FS
Tolerancia Span	<± 2% de FS	<± 1,5% de FS	<± 2% de FS	<± 1,5% de FS
Carga de Salida	000 a 800 Ohm @ 10-	10k Ohm, min	<± 2% de FS	10K Ohm, min
Protección contra la polaridad	28VDC Si	Si	> 1M Ohm -	Si

SENSOR DE CAUDAL





Figura 71. Caudalímetros

La serie de caudalímetros de paleta 2537 tiene características de caudal bajo, potencia baja y alta resolución con varias opciones de salida como:

- Conmutador de caudal, divisor de impulsos, digital (S3L) o 4-20 mA, esta unidad puede configurarse en el propio lugar de operación directamente a través de la interfaz de usuario incorporada

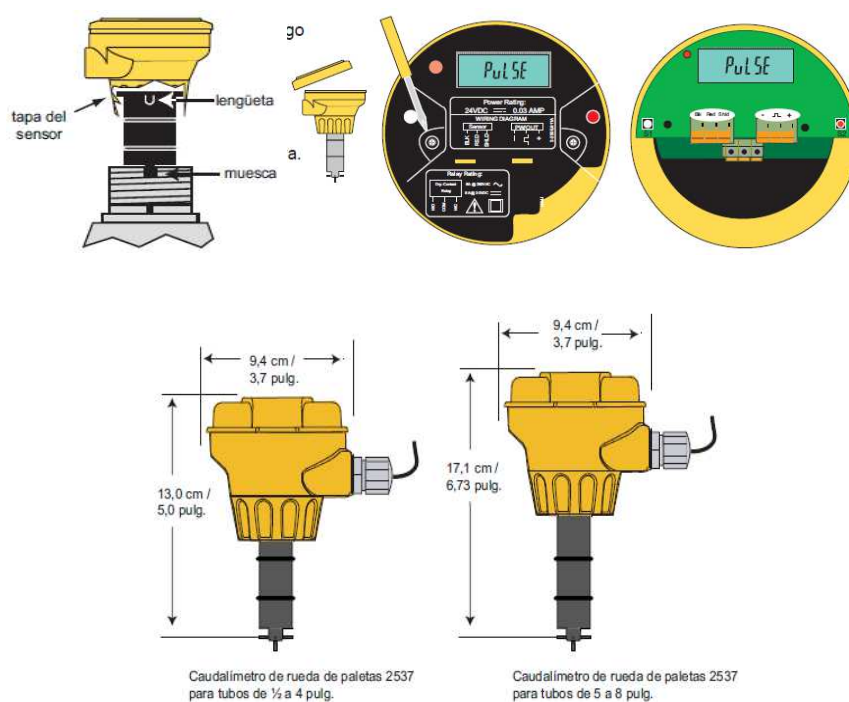


Figura 72. Caudalímetro electrónico

- Proporciona salida digital (S3L) para utilizarse con el controlador de multiparámetros Signet 8900.
- De 4-20 mA con salida ciega de circuito de corriente.
- El modelo del Conmutador de caudal (FlowSwitch) utiliza un relé sencillo (mecánico o de estado sólido) para la operación de alarma alta o baja.
- El modelo de impulsos utiliza un relé y tiene dos modalidades de operación seleccionables: la modalidad Divisor (Divide) reduce la escala de frecuencia de la rueda de paletas para admitir dispositivos de entrada de baja frecuencia, en el modo total, el modelo de impulsos se convierte en un generador de impulsos de bomba tradicional con capacidad de producir un impulso por volumen de líquido dado.
- Dispone de una pantalla pequeña de LCD que permite programar el equipo sin necesidad de equipos externos; la pantalla no es visible.

4. METODOLOGÍA:

4.1. Metodología para optimización de turnos de riego

Para abordar este tema hablaremos de diferentes trabajos que se han desarrollado al respecto.

Las técnicas heurísticas no logran garantizar la obtención de la solución óptima, ya que son técnicas basadas en reglas simples y, generalmente, dependen del buen criterio del operador. La programación dinámica no modela de forma adecuada restricciones temporales para problemas de tamaño realista debido a que el número de estados que debe considerar aumenta exponencialmente, dando lugar a un tiempo de cálculo excesivo. La programación lineal entera-mixta proporciona una aproximación a la solución óptima, ya que no puede modelar con exactitud la función objetivo no lineal. Sin embargo, para producir soluciones factibles requiere el uso de procedimientos heurísticos que pueden deteriorar la calidad de la solución encontrada. Todos estos inconvenientes han llevado a la búsqueda de nuevos métodos de resolución que permitan obtener las “mejores” soluciones cuasi-óptimas (Arroyo, 2000)

Con este antecedente, varios autores han dedicado sus investigaciones a proponer métodos para que el diseño de redes presurizadas para abastecimiento o riego cumplan eficientemente las prestaciones de servicio y operación, considerando el factor económico como una variable decisiva en la resolución de este tipo de problemas. Citaremos algunos de ellos que tienen referencia directa con el tema que se trata en esta tesis:

Calvo et. Al (2007), trabajaron en un algoritmo que combina programación dinámica y el cálculo hidráulico de redes presurizadas para organizar los turnos de una jornada de riego determinada, consiguiendo minimizar el consumo de la energía que demanda la red de riego en todos los turnos.

Lara (2000) desarrolla un modelo de diseño óptimo de redes colectivas de riego que incluye y aprovecha de forma eficiente la distribución de caudales por turnos en donde se logra un equilibrio energético en los mismos, cuando se trata de una red alimentada por sistema de bombeo.

Gutiérrez et. Al (2010) también abordan el tema energético y maximiza su ahorro a través de variadores de frecuencia, planteando un método que ordena la operación del riego por bloques estandarizados con áreas compactas similares.

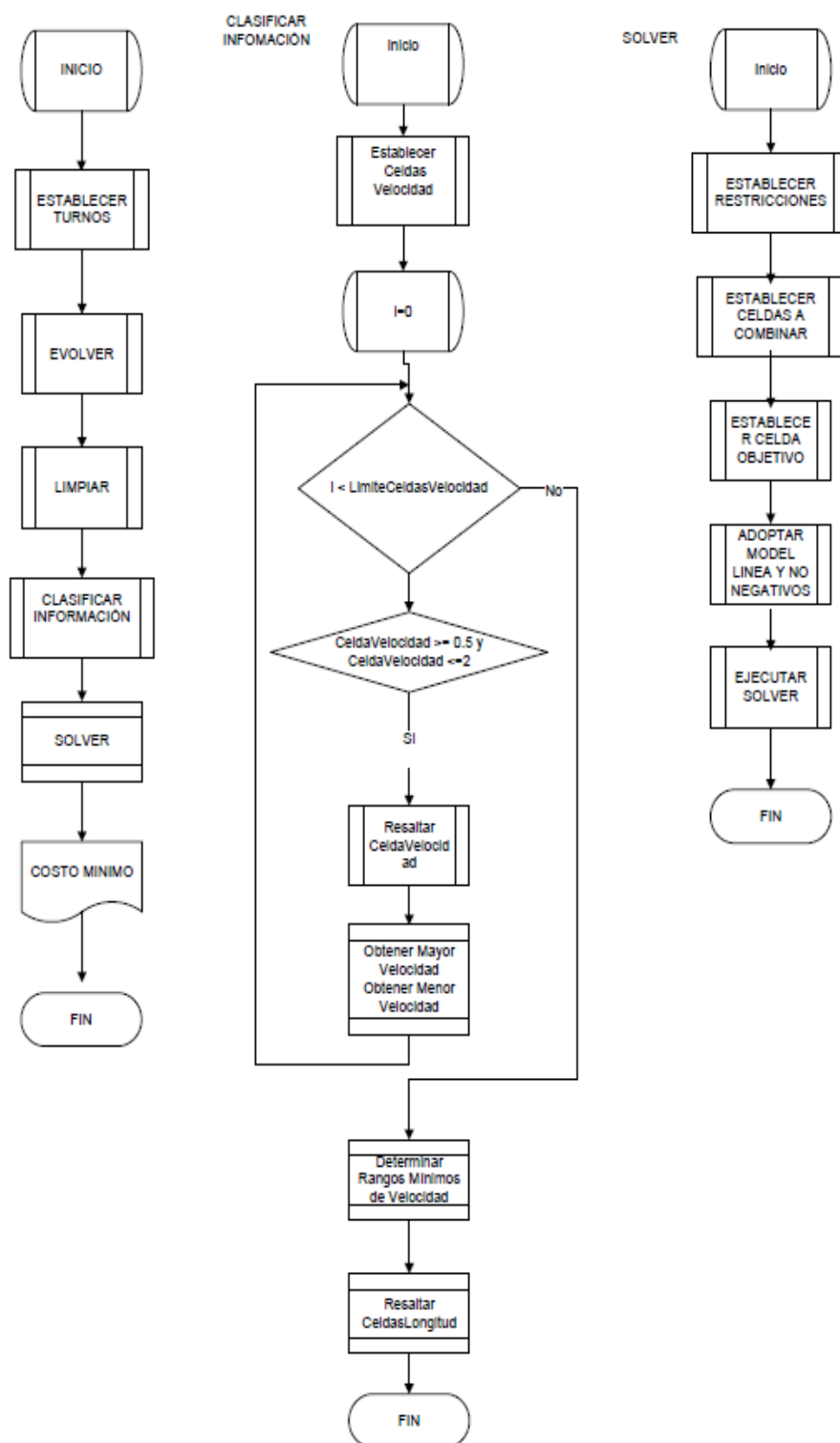
Mora et. Al (2010) minimizan los costes de inversión de redes de abastecimiento a través de técnicas evolutivas obteniendo resultados satisfactorios, los cuales se adoptarán en función de las necesidades de diseño en cada caso particular.

Villa (2010) propone una metodología para la ubicación óptima de hidrantes en una red de riego a través de un modelo de programación entera binaria que obtiene eficiencia espacial.

El propósito de este trabajo es obtener la solución de diseño más económica, a través de encontrar la combinación de hidrantes óptima para cada turno que se encuentre asignado en los nudos de una red de riego presurizada, para lo cual se propone dos métodos.

4.1.1. Método PLYAG

El método híbrido (**PLYAG**), en el cual se desarrolla un proceso con el empleo de programación lineal PL y algoritmos genéticos, cuyo diagrama de flujo se detalla a continuación:



Se detalla el proceso que se ha considerado:

1. Definir todas las variables agronómicas, ubicación de hidrantes, trazado de la red, número de turnos de riego; con ello procederemos a determinar el caudal de diseño de cada línea de la red que se obtiene de la sumatoria de los caudales de las tomas o hidrantes abiertos aguas abajo en cada turno de riego.
2. Calcularla probabilidad de funcionamiento de los hidrantes en los turnos designados, con la finalidad de conocer las necesidades de caudal por jornada de riego.

$$p = \frac{q_f \cdot S}{q_D}$$

Siendo:

S:	superficie servida en ha
q _f :	caudal ficticio continuo l/s
q _D :	dotación suministrada por hidrante en l/s

3. Construcción de la topología de la red

En este ítem se deberá armar la topología de la red en donde se colocará todas las características de los elementos que la conforman: longitudes, cotas, caudales de circulación, etc. Esta fase se trabajará en una hoja en MS Excel.

4. Aplicación del modelo de programación lineal definiendo la función objetivo y las restricciones con el objeto de minimizar el costo.

Consiste en formular matemáticamente el problema de optimización del total de los costes anuales que demandan estas redes (instalación y funcionamiento) considerando las restricciones referentes a ecuación de continuidad, ecuación de la energía y presiones máximas y mínimas en los nudos de demanda de cada uno de los turnos que se va implementar en la jornada de riego.

Se han considerado múltiples estados de carga, es decir, n turnos con una fuente de alimentación y altura piezométrica conocida como hipótesis de diseño.

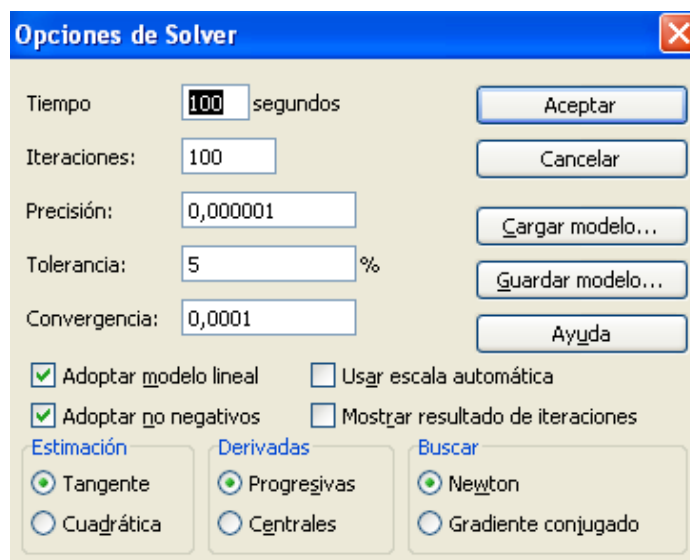
La formulación global del problema de dimensionado óptimo consistirá en minimizar la siguiente función objetivo, configurada por los costes asociados a las tuberías, esto es:

$$C_i = \sum_{j=1}^k \sum_{j=1}^{ND} c_j \cdot L_{i,j}$$

Siendo:

- C_i = Coste total de las tuberías de la línea i (€)
- C_j = Coste unitario del diámetro D (€/metro lineal)
- L_{ij} = Longitud del tramo de diámetro D en la línea i (m)

La optimización del costo a través de PL, queda definida en la aplicación Solver como:



Restricciones:

- Las restricciones de presión mínima en cada turno 1, 2, o 3 son:

$$\sum_{i \in S_{0,m,k}} h_{f,i} = \sum_{i \in S_{0,m}} \sum_{j=1}^{ND} j_{i,j,k} \cdot L_{i,j} \leq \Delta H_{0,m,k} \quad \forall \text{ turno } k \text{ y nudo } m$$

Siendo:

- $J_{i,j,k} L_{i,j}$: Pérdida de carga (m) en la línea i, del turno k
- $S_{0,m,k}$: Conjunto de líneas pertenecientes al trayecto entre los nudos 0 y m con su respectivo turno k

$\Delta H_{0,m,k}$: Máxima pérdida de carga admisible (m) en el trayecto comprendido entre los nudos 0 y m y el turno k que corresponda.

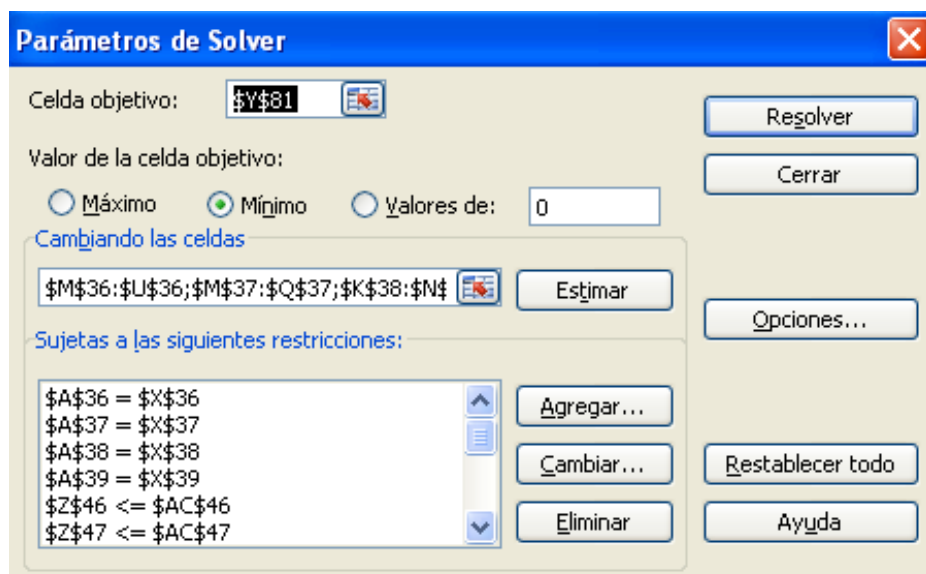
- Limitaciones de tipo geométrico, a fin de asegurar que la suma de las longitudes parciales $L_{i,j}$, en una línea sea exactamente igual a la longitud de la misma:

$$\sum_{j=1}^{ND} L_{i,j} = L_i \quad \forall \text{ línea } i$$

- Para evitar los problemas de sedimentación y erosión se considera velocidades límite en el rango de [0,50; 2,00] m/s, obteniendo una matriz que resulta de superponer los rangos de diámetros que se obtienen en cada línea y que cumplan con los requisitos mencionados para cada turno de riego definido (de modo que no quede excluido ningún diámetro que ha sido admitido en alguno de los turnos).

Justamente esta restricción permitirá definir las ventanas de diámetros candidatos por limitaciones de velocidad (rango que deberá marcarse en sitio *cambiando las celdas de parámetros de Solver*), de manera que el problema queda mucho más acotado y el número de condiciones y restricciones necesarias para resolverlo disminuye consecuentemente.

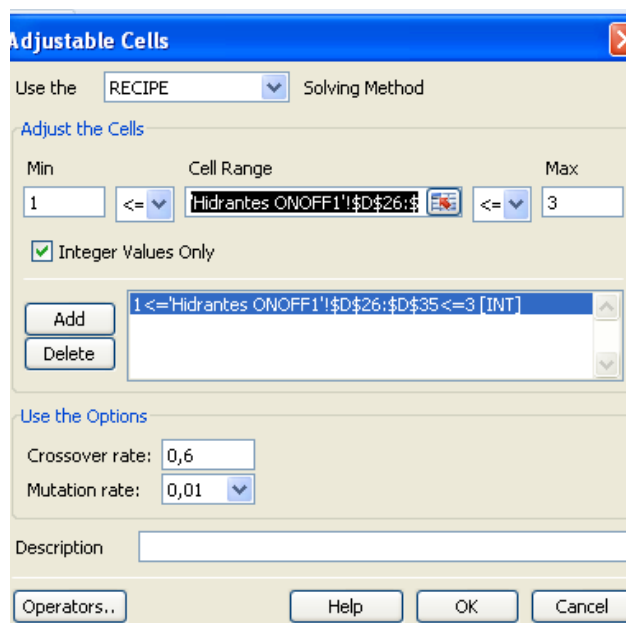
Estas restricciones deben ir colocadas como sigue:



La macro denominada Solviendo resuelve el proceso de clasificación de velocidad, una vez que tiene clasificados define las celdas que va a combinar, luego resuelve el modelo a través de Solver, con las restricciones planteadas. Luego el programa Evolver plantea los turnos, llama a la macro Solviendo a través de un proceso iterativo

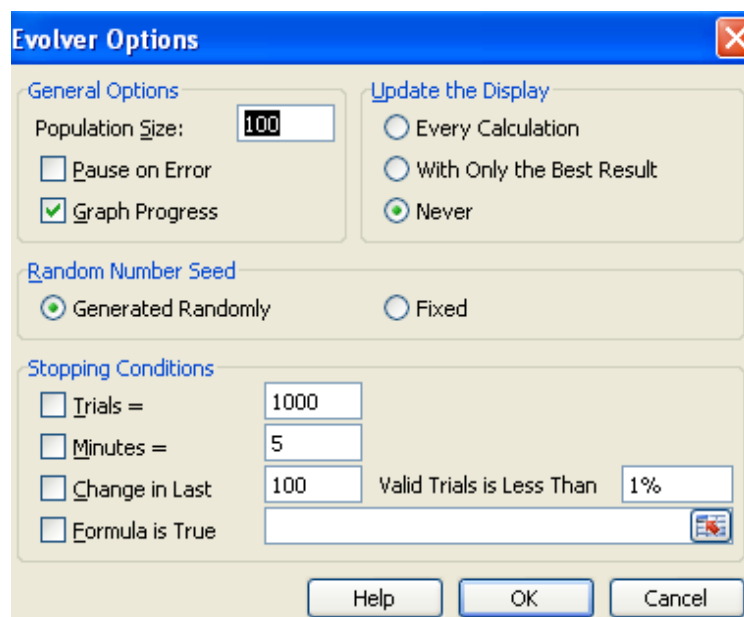
5. Ensamblado del modelo de asignación de turnos. Colocaremos en una hoja en Excel los siguientes datos: cantidad de hidrantes, nudo, número de hidrante, número de turno, área de cobertura de riego, caudal demandado, probabilidad.
6. Combinación de hidrantes para optimizar el costo total.- A través del software Evolver se plantean turnos al azar de los nudos con hidrantes de la red, seguido se ejecuta la macro Solviendo a través de Solver, en la cual se encuentran establecidas las restricciones que se considerarán en el modelo (velocidad máxima y mínima, presión en nudos, longitudes de líneas); posteriormente Solver resuelve el modelo con las mencionadas restricciones y busca el costo mínimo; se inicia con esto un proceso iterativo hasta encontrar el costo deseado.

Para ello, en las propiedades de “AdjustableCells” (en Evolver), ajuste de celdas, se señala la opción “recipe”, que consiste en la asignación de un valor aleatorio comprendido entre los límites (desde 1 a 3, con valores enteros, esto es 1, 2 o 3, que serán los tres turnos considerados en esta red)

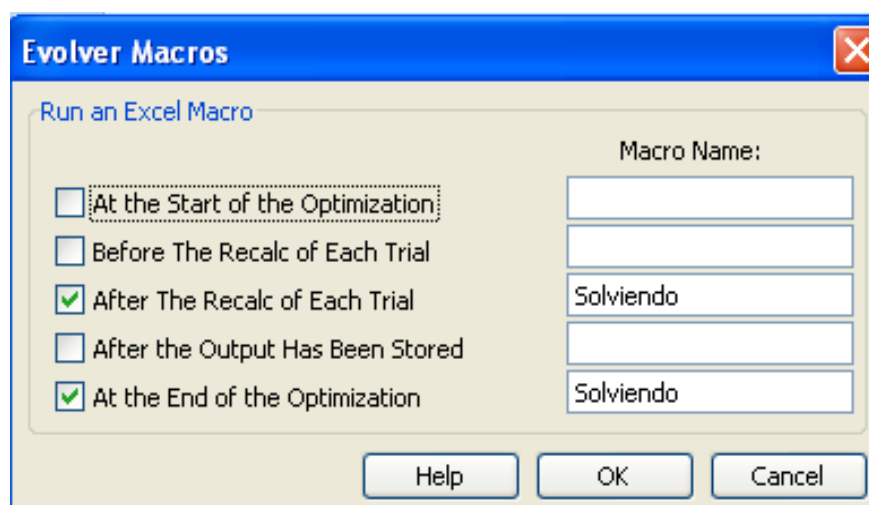


En la celda *CellRange*, se definirá las celdas en donde se encuentran ubicados los hidrantes a combinar.

En el ítem “*EvolverOptions*”, colocamos:



Finalmente, se llama a la macro denominada Solviendo, de tal manera que con cada iteración de Evolver se ejecute la macro de programación lineal Solviendo.



7. Aplicación del software Diopram por comparativa de diseño con la metodología desarrollada.

Con el objeto de verificar la conveniencia de aplicar la metodología propuesta en este trabajo en comparación de obtener el diseño usando solamente PL que usa el software Diopram, vamos a resolver la red en estudio con el software mencionado.

8. Simulación del modelo resultante a través de Epanet. Presentación de resultados.

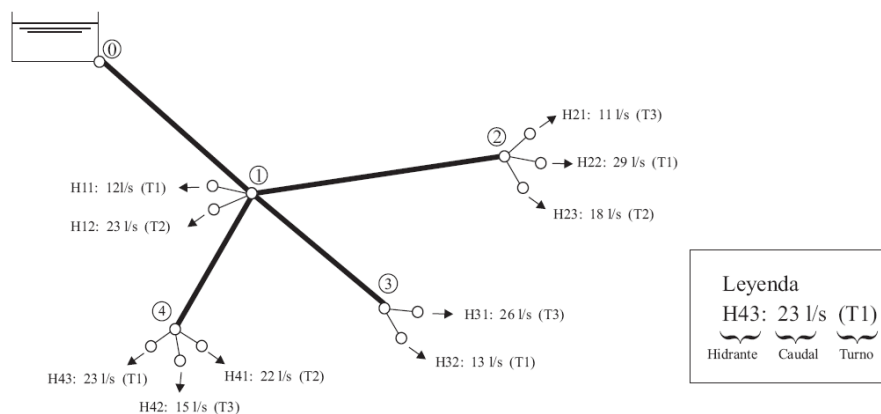
Para verificar el funcionamiento de las prestaciones de servicio en cuanto a caudales en líneas, presiones en nudos y velocidades en las mismas se modelará en el software Epanet 2.0 las redes en las cuales se ha implementado la metodología propuesta.

DESARROLLO:

APLICACIÓN DEL METODO A CASOS DE ESTUDIO

EJEMPLO DE UNA RED DE 4 LINEAS CON 10 HIDRANTES

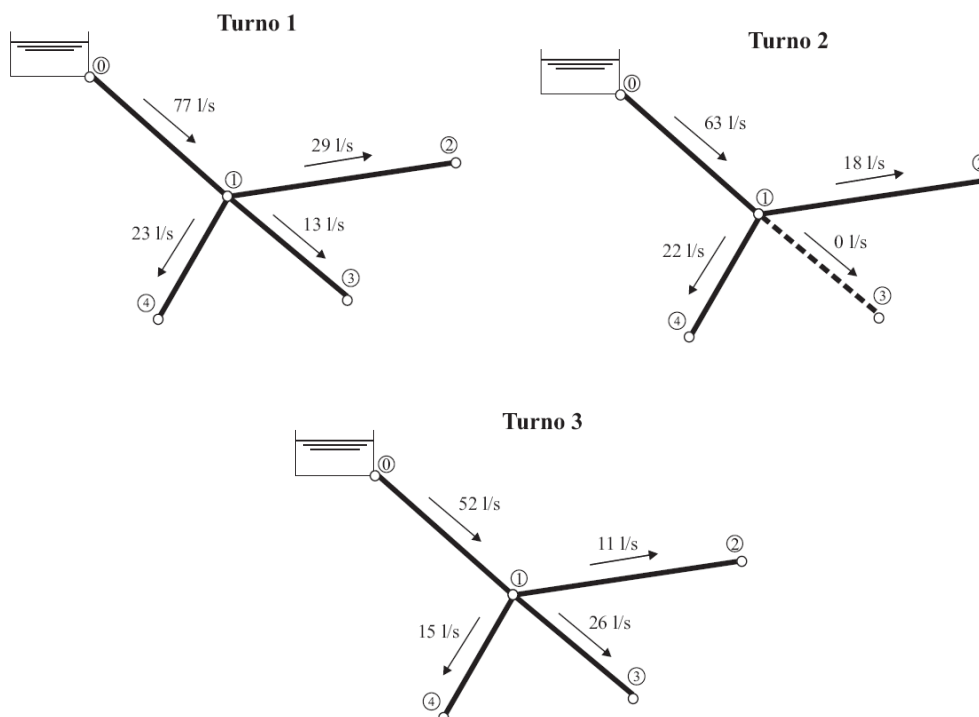
Tenemos una red que tiene un nudo cabecera, 4 líneas y la distribución de hidrantes inicial como consta en la gráfica



Partimos con la información general de la red enunciada:

Viscosidad cinemática	0'000001	m ² /s
Rugosidad	0'01	mm
<u>Curva de coste de la tubería</u>		
	Coefficiente A	0'0011929
	Exponente a	1'9434121
Caudal ficticio continuo		1 l/(s.ha)
Jornada de riego		18 horas
Número de turnos		3
Garantía de suministro		99 %

La distribución de caudales que circulan por las líneas 1, 2, 3 y 4 de la red según el turno asignado es como sigue:



Y seguimos el proceso de la metodología implementada:

1. Luego de definir todas las variables agronómicas, el trazado de la red, número de turnos de riego, ubicamos el número de hidrantes por nudo, el turno al que corresponde, el área que está cubriendo la toma de riego y la demanda necesaria en cada uno de ellos. Así como también en la última columna hemos calculado la probabilidad de funcionamiento:

Cuadro. 1. Datos del modelo:

NH	Nudo	Hidrante (h)	Núm. Turno	Área x h (ha)	Qh (l/s)	Prob_h
1	1	1	1	2'652	12'00	0'295
2	1	2	2	4'448	23'00	0'258
3	2	1	1	6'948	29'00	0'319
4	2	2	2	4'229	18'00	0'313
5	2	3	3	2'466	11'00	0'299
6	3	1	1	2'933	13'00	0'301
7	3	2	3	5'895	26'00	0'302
8	4	1	1	4'679	23'00	0'271
9	4	2	2	4'766	22'00	0'289
10	4	3	3	3'130	15'00	0'278

2. Calculamos los caudales circulantes en cada una de las líneas que corresponden al turno designado, en este caso hemos definido tres turnos de riego.

Q TT1	Q TT2	Q TT3	SQTT
52	88	52	192

Q T1	Q T2	Q T3
0	12	0
0	23	0
29	0	0
0	18	0
0	0	11
0	13	0
0	0	26
23	0	0
0	22	0
0	0	15

3. Construcción de la topología de la red

Se arma la topología de la red con las características de los elementos que la conforman: longitudes, cotas, y caudales de circulación que variarán en función del turno designado.

Cuadro 2. Caudales circulantes según turno.

Turno 1			
Línea / Nudo	Cota (m)	Caudal línea (l/s)	Longitud (m)
0	80		
1	40	52	2.000
2	30	29	2.400
3	45	0	1.200
4	20	23	1.500

Turno 2			
Línea / Nudo	Cota (m)	Caudal línea (l/s)	Longitud (m)
0	80		
1	40	88	2.000
2	30	18	2.400
3	45	13	1.200
4	20	22	1.500

Turno 3			
Línea / Nudo	Cota (m)	Caudal línea (l/s)	Longitud (m)
0	80		
1	40	52	2.000
2	30	11	2.400
3	45	26	1.200
4	20	15	1.500

4. Aplicación del modelo de programación lineal definiendo la función objetivo y las restricciones con el objeto de minimizar el costo.

Se introducen las condiciones de velocidad mínima y máxima en el rango de [0'50; 3'50] m/s, de esta manera se limitan los problemas de sedimentación típicos en las tuberías con baja velocidad de transporte de fluidos y los problemas de erosión ocasionados por las altas velocidades.

Para cada uno de los diámetros comerciales de la serie de diámetros de tuberías (existentes en Ecuador), se determinan la velocidad en cada línea de la red. Así se definen las ventanas de diámetros candidatos por limitaciones de velocidad, de manera que el problema queda mucho más acotado y el número de condiciones y restricciones necesarias para resolverlo disminuye consecuentemente.

Cuadro 3. Diámetros candidatos en cada turno de riego con el criterio de velocidad, en el rango de 0,5 a 2 m/s

		TURNO 1 DIAMETROS (mm)																			
Línea	q (l/s)	25	32	40	50	63	75	90	110	125	140	160	200	225	250	315	355	400	450	500	630
1	52	105'93	64'66	41'38	26'48	16'68	11'77	8'17	5'47	4'24	3'38	2'59	1'66	1'31	1'06	0'67	0'53	0'41	0'33	0'26	0'17
2	29	59'08	36'06	23'08	14'77	9'30	6'56	4'56	3'05	2'36	1'88	1'44	0'92	0'73	0'59	0'37	0'29	0'23	0'18	0'15	0'09
3	0	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00
4	23	46'86	28'60	18'30	11'71	7'38	5'21	3'62	2'42	1'87	1'49	1'14	0'73	0'58	0'47	0'30	0'23	0'18	0'14	0'12	0'07
		TURNO 2 DIAMETROS (mm)																			
Línea	q (l/s)	25	32	40	50	63	75	90	110	125	140	160	200	225	250	315	355	400	450	500	630
1	88	179'27	109'42	70'03	44'82	28'23	19'92	13'83	9'26	7'17	5'72	4'38	2'80	2'21	1'79	1'13	0'89	0'70	0'55	0'45	0'28
2	18	36'67	22'38	14'32	9'17	5'77	4'07	2'83	1'89	1'47	1'17	0'90	0'57	0'45	0'37	0'23	0'18	0'14	0'11	0'09	0'06
3	13	26'48	16'16	10'35	6'62	4'17	2'94	2'04	1'37	1'06	0'84	0'65	0'41	0'33	0'26	0'17	0'13	0'10	0'08	0'07	0'04
4	22	44'82	27'35	17'51	11'20	7'06	4'98	3'46	2'31	1'79	1'43	1'09	0'70	0'55	0'45	0'28	0'22	0'18	0'14	0'11	0'07
		TURNO 3 DIAMETROS (mm)																			
Línea	q (l/s)	25	32	40	50	63	75	90	110	125	140	160	200	225	250	315	355	400	450	500	630
1	52	105'93	64'66	41'38	26'48	16'68	11'77	8'17	5'47	4'24	3'38	2'59	1'66	1'31	1'06	0'67	0'53	0'41	0'33	0'26	0'17
2	11	22'41	13'68	8'75	5'60	3'53	2'49	1'73	1'16	0'90	0'71	0'55	0'35	0'28	0'22	0'14	0'11	0'09	0'07	0'06	0'04
3	26	52'97	32'33	20'69	13'24	8'34	5'89	4'09	2'74	2'12	1'69	1'29	0'83	0'65	0'53	0'33	0'26	0'21	0'16	0'13	0'08
4	15	30'56	18'65	11'94	7'64	4'81	3'40	2'36	1'58	1'22	0'97	0'75	0'48	0'38	0'31	0'19	0'15	0'12	0'09	0'08	0'05

En el cuadro 4, consta la pendiente hidráulica para cada línea de la red planteada, con los turnos definidos, mediante la formulación de Darcy:

$$j = \frac{h_f}{L} = \frac{8 \cdot f \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5}$$

En el cuadro 5, se muestra las particiones de los diámetros usados, así como las longitudes que corresponden a cada uno de los diámetros por tramo, en donde luego de la optimización se cumple la restricción geométrica introducida de $\sum_{j=1}^{N_D} L_{ij} = L_i, \forall i = 1 \dots n$. El resultado de la optimización implica como máximo dos diámetros por cada tubería.

El valor de las pérdidas totales se obtiene multiplicando la pendiente hidráulica por las longitudes de tubería obtenidas en cada tramo, cuadro 6. La presión de cada nudo se obtiene a continuación como diferencia de la energía de cada uno y la cota del mismo, siendo ésta la otra restricción del problema de optimización, cuadro 7, considerando que se debe cumplir:

$$P_i \geq 15mca$$

Cuadro 4. Valores de pendiente hidráulica obtenidos en el modelo con condiciones iniciales

		TURNO 1																				
		DIAMETROS (mm)																				
Línea	q (l/s)	25	32	40	50	63	75	90	110	125	140	160	200	225	250	315	355	400	450	500	630	
1	52	457'57	133'17	43'64	14'30	4'50	1'88	0'76	0'28	0'15	0'08	0'04	0'01	0'01	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00
2	29	142'31	41'42	13'57	4'45	1'40	0'59	0'24	0'09	0'05	0'03	0'01	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00
3	0	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00
4	23	89'52	26'05	8'54	2'80	0'88	0'37	0'15	0'05	0'03	0'02	0'01	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00
		TURNO 2																				
		DIAMETROS (mm)																				
Línea	q (l/s)	25	32	40	50	63	75	90	110	125	140	160	200	225	250	315	355	400	450	500	630	
1	88	1310'44	381'39	124'97	40'95	12'89	5'39	2'17	0'79	0'42	0'24	0'12	0'04	0'02	0'01	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00
2	18	54'83	15'96	5'23	1'71	0'54	0'23	0'09	0'03	0'02	0'01	0'01	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00
3	13	28'60	8'32	2'73	0'89	0'28	0'12	0'05	0'02	0'01	0'01	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00
4	22	81'90	23'84	7'81	2'56	0'81	0'34	0'14	0'05	0'03	0'01	0'01	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00
		TURNO 3																				
		DIAMETROS (mm)																				
Línea	q (l/s)	25	32	40	50	63	75	90	110	125	140	160	200	225	250	315	355	400	450	500	630	
1	52	457'57	133'17	43'64	14'30	4'50	1'88	0'76	0'28	0'15	0'08	0'04	0'01	0'01	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00
2	11	20'48	5'96	1'95	0'64	0'20	0'08	0'03	0'01	0'01	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00
3	26	114'39	33'29	10'91	3'57	1'13	0'47	0'19	0'07	0'04	0'02	0'01	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00
4	15	38'07	11'08	3'63	1'19	0'37	0'16	0'06	0'02	0'01	0'01	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00

Cuadro 5. Valores de longitud en cada línea del modelo, luego de aplicar PL

		DIAMETROS (mm)					
Línea	q (l/s)	140'00	160'00	200'00	225'00	250'00	315'00
1'00	52'00	0'00	0'00	0'00	0'00	1.849'80	150'20
2'00	11'00	0'00	1.783'88	616'12	0'00	0'00	0'00
3'00	26'00	0'00	995'48	204'52	0'00	0'00	0'00
4'00	15'00	1.200'76	299'24	0'00	0'00	0'00	0'00

Cuadro 6. Pérdidas en las líneas del modelo

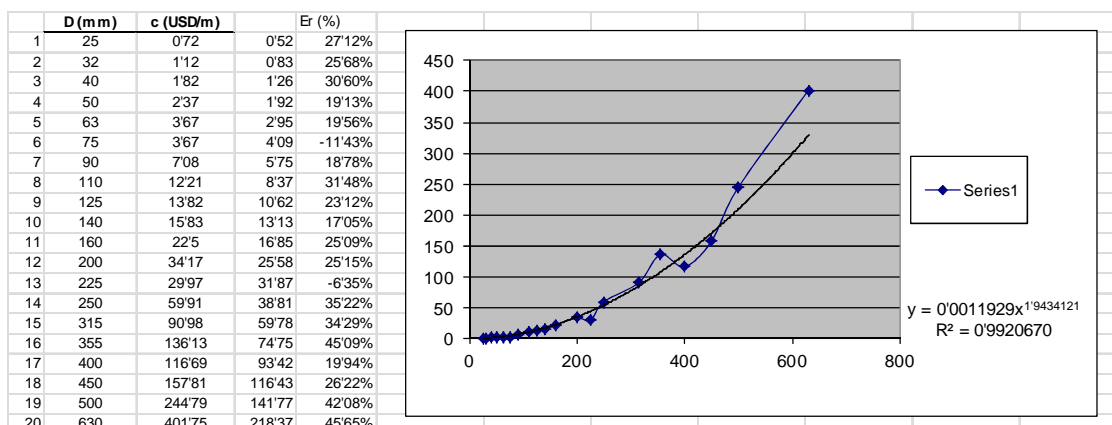
		TURNO 1																			
		DIAMETROS (mm)																			
Línea	q (l/s)	25	32	40	50	63	75	90	110	125	140	160	200	225	250	315	355	400	450	500	630
1	52	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	8'46	0'22	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00
2	29	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	23'64	2'68	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00
3	0	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00
4	23	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	19'52	2'49	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00
		TURNO 2																			
		DIAMETROS (mm)																			
Línea	q (l/s)	25	32	40	50	63	75	90	110	125	140	160	200	225	250	315	355	400	450	500	630
1	88	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	24'24	0'62	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00
2	18	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	9'11	1'03	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00
3	13	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	2'65	0'18	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00
4	22	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	17'86	2'28	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00
		TURNO 3																			
		DIAMETROS (mm)																			
Línea	q (l/s)	25	32	40	50	63	75	90	110	125	140	160	200	225	250	315	355	400	450	500	630
1	52	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	8'46	0'22	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00
2	11	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	3'40	0'38	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00
3	26	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	10'61	0'71	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00
4	15	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	8'30	1'06	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00

En el cuadro 7, se observa la altura de energía de toda la red y se comprueba que la condición de presión requerida se cumple satisfactoriamente, en las líneas que corresponden a cada turno.

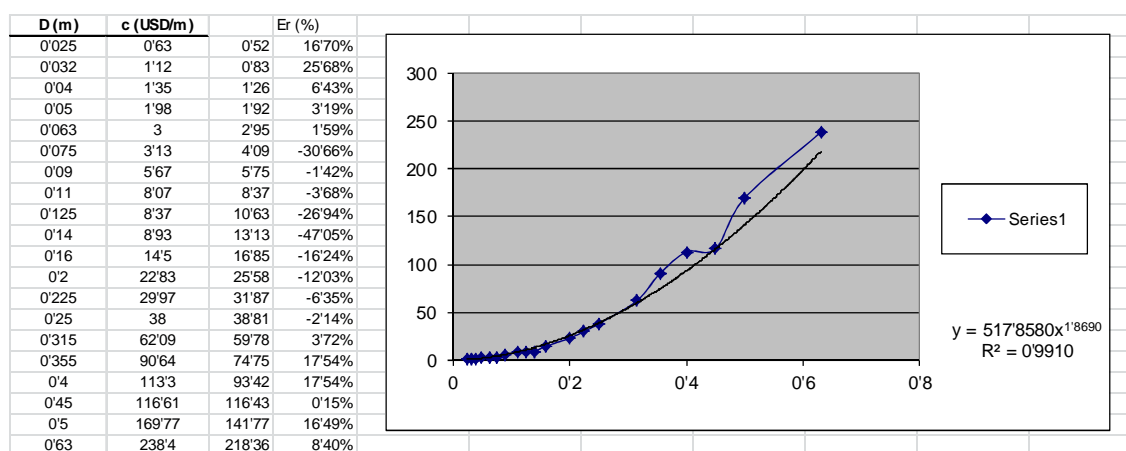
Cuadro 7. Presión en cada nudo de la red

Zo	80	m		
TURNO 1				
PERDIDAS	PERD AL NUDO	Z	pmin	Zo-Hmin
8'68	8'68	40	15'00	25'00
26'32	35'00	30	15'00	35'00
0'00	8'68	45	15'00	20'00
22'01	30'69	20	15'00	45'00
TURNO 2				
24'86	24'86	40	15'00	25'00
10'14	35'00	30	15'00	35'00
2'83	27'69	45	0'00	35'00
20'14	45'00	20	15'00	45'00
TURNO 3				
8'68	8'68	40	15'00	25'00
3'79	12'47	30	15'00	35'00
11'32	20'00	45	15'00	20'00
9'36	18'04	20	15'00	45'00

Finalmente, el coste por metro lineal de las tuberías empleadas resulta de la ecuación procedente del ajuste de los costes de los diámetros comerciales discretos mediante una relación potencial del tipo $c = A \cdot D^b$. La relación obtenida para la serie propuesta en la red que nos atañe es: $c = 0,0011929 \cdot D^{1,9434121}$ (D en mm y c en USD/m).



Si obtenemos estos coeficientes con el diámetro expresado en metros tenemos:



Una vez resuelto el problema, comprobamos que el rango adoptado no condiciona en ningún momento con la solución del problema, puesto que dentro de cada una de las ventanas de diámetros candidatos abierta para cada una de las líneas, los resultados de la optimización se encuentran centrados dentro del rango de resultados factibles, que corresponde al coste por línea:

Linea	q (l/s)	DIAMETROS (mm)						Costo
		140'00	160'00	200'00	225'00	250'00	315'00	
1'00	77'00	0'00	0'00	0'00	0'00	100.905'56	12.838'46	113.744'02
2'00	29'00	0'00	40.877'46	21.782'95	0'00	0'00	0'00	62.660'41
3'00	13'00	0'00	22.811'25	7.230'93	0'00	0'00	0'00	30.042'18
4'00	23'00	21.226'20	6.857'00	0'00	0'00	0'00	0'00	28.083'20
								234.529'80

5. Para la asignación de turnos, la hoja en Excel que se ha implementado es:

NH	Nudo	Hidran	TURNO	Ah (ha)	Qh (l/s)
1	1	1	2	2'652	12'0
2	1	2	2	4'448	23'0
3	2	1	1	6'948	29'0
4	2	2	2	4'229	18'0
5	2	3	3	2'466	11'0
6	3	1	2	2'933	13'0
7	3	2	3	5'895	26'0
8	4	1	1	4'679	23'0
9	4	2	2	4'766	22'0
10	4	3	3	3'130	15'0

6. Combinación de hidrantes. El resultado del método híbrido desarrollado, con la combinación óptima de hidrantes para obtener el menor costo posible adquiere la siguiente disposición de turnos en los nudos donde se encuentran ubicados los hidrantes:

NH	Nudo	Hidran	TURNO	Ah (ha)	Qh (l/s)
1	1	1	2	2'652	12'0
2	1	2	2	4'448	23'0
3	2	1	1	6'948	29'0
4	2	2	2	4'229	18'0
5	2	3	3	2'466	11'0
6	3	1	2	2'933	13'0
7	3	2	3	5'895	26'0
8	4	1	1	4'679	23'0
9	4	2	2	4'766	22'0
10	4	3	3	3'130	15'0

Q TT1	Q TT2	Q TT3	SQTT
52	88	52	192

Q T1	Q T2	Q T3
0	12	0
0	23	0
29	0	0
0	18	0
0	0	11
0	13	0
0	0	26
23	0	0
0	22	0
0	0	15

Coste	234,529'80	USD
--------------	-------------------	-----

7. Aplicación del software Diopram por comparativa de diseño con la metodología desarrollada. Señalaremos, que se ha diseñado la red con la modalidad a la demanda, con los parámetros de entrada siguientes:

- Cota de cabecera conocida
- Garantía de funcionamiento
- Diseño de caudales por Clément

Para lo cual también ingresamos en el software Diopram la topología de la red como se muestra en la gráfica.

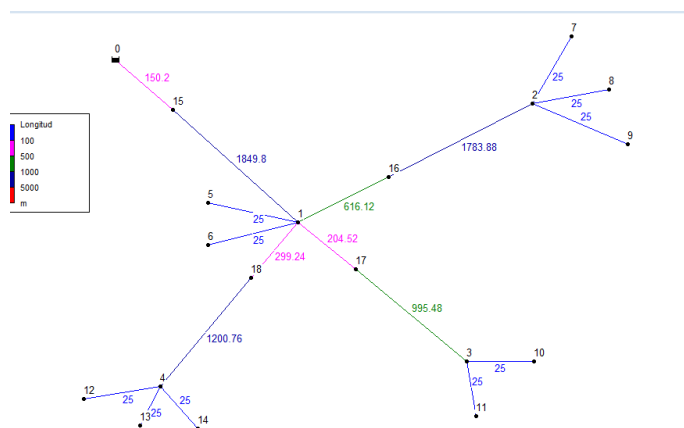
	Id Línea	Nudo Inicial	Nudo Final	Z (m)	PMin (mca)	QI (l/seg)	L (m)	DN	D (mm)	Nº Hidr.	QAc (l/seg)	Om (l/seg)	Vc (l/seg) ²
1	1	0	1	40,0	15,0	123,47	2000,0	450	449,99	2	35,0	9,47	131,16
2	2	1	2	30,0	15,0	56,97	2400,0	225	211,0	3	58,0	18,19	277,89
3	3	1	3	25,0	15,0	42,82	1200,0	315	299,6	2	39,0	11,77	178,13
4	4	1	4	20,0	15,0	53,49	1500,0	355	302,4	3	60,0	16,77	249,17
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													

Obtenemos el coste total en dólares igual a:

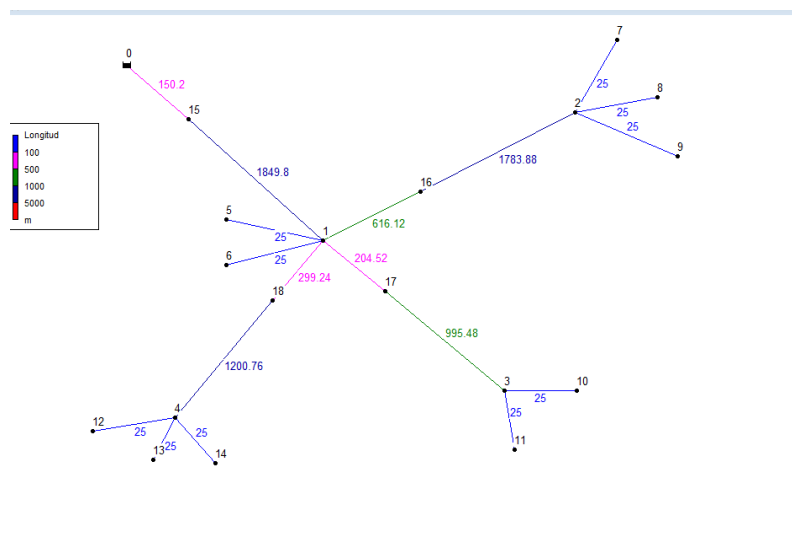
LINEAS	CAUDAL	LONGITUD	DIAMETRO	COSTE/m	COSTE TOTAL	
1	123,471		2000	450	116,61	233.220
2	56,97		2400	225	29,97	71.928
3	42,818		1200	315	62,09	74.508
4	53,488		1500	355	110,8	166.200
					\$ 545.856	

8. Simulación del modelo resultante a través de Epanet.

Los resultados que se obtienen con el modelo optimizado por el método híbrido son las que se observan en los siguientes gráficos

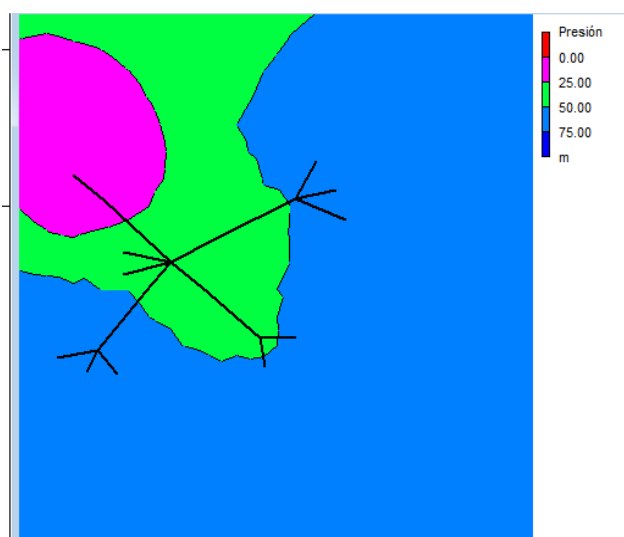


Presiones en cada nudo de la red

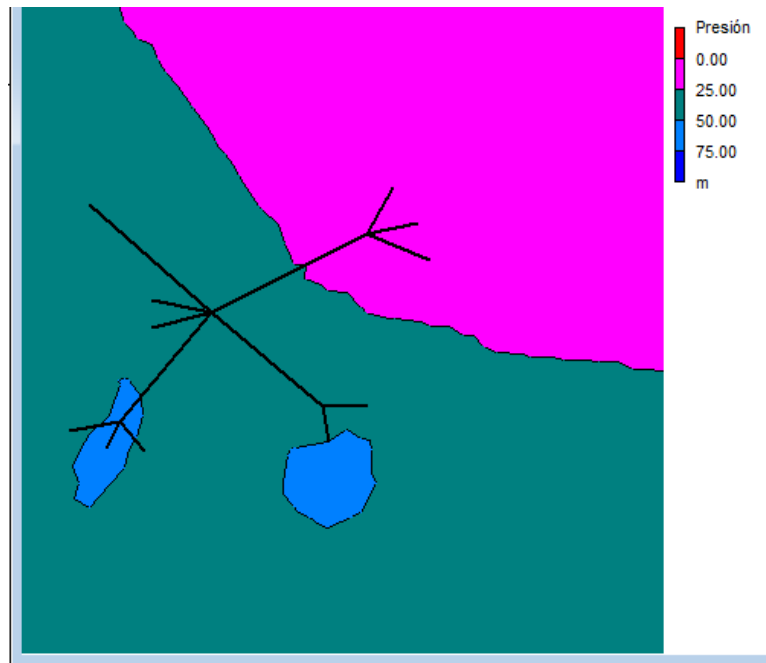


Tramos de longitudes implementadas en la red

Cuando analizamos el mapa de contorno de presiones en la tercera hora observamos el equilibrio energético que se genera al implementar la metodología PLYAG

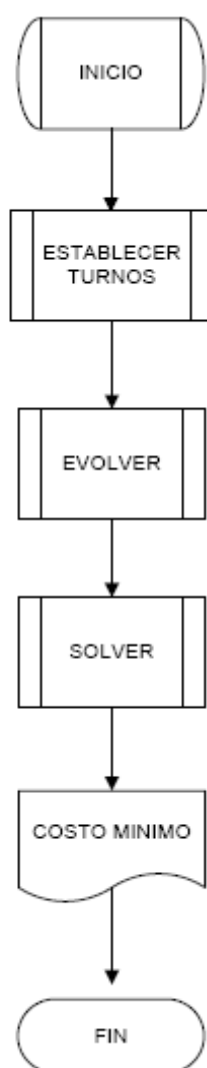


En contraste con la distribución de presiones que se genera al modelar la misma red funcionando a la demanda, en donde se observa que las presiones de trabajo no se encuentran con distribución equilibrada en los nudos de demanda.



4.1.2. Método PNL YAG

Otro método híbrido que en esta investigación se ha implementado es **PNLYAG**, desarrollo con Programación no lineal (PNL) y Algoritmos genéticos (AG), a través del cual también se obtiene la combinación óptima de hidrantes y corresponde al siguiente diagrama:



La secuencia para implementar el modelo se detalla:

1. Aplicación de los ítems 1, 2, 3 del modelo híbrido (PLYAG).

2. Aplicación del modelo de Programación no lineal, definiendo la función objetivo y las restricciones con el objeto de minimizar el costo.

Se ha estimado múltiples estados de carga es decir n turnos, considerando una fuente de alimentación con altura piezométrica conocida como hipótesis de diseño.

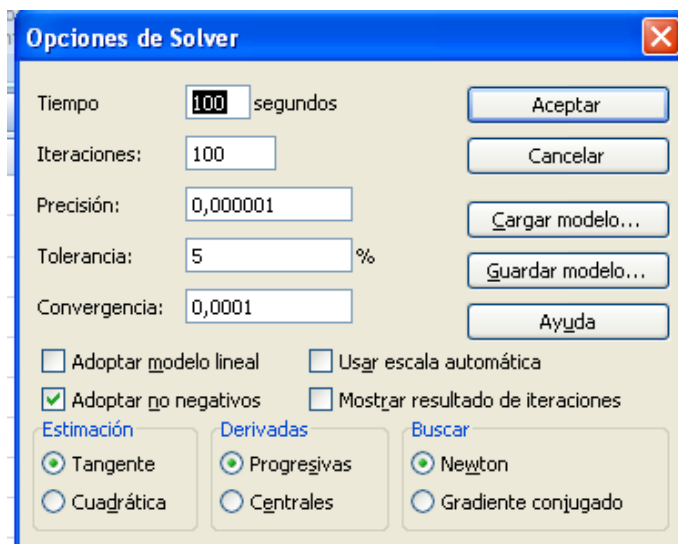
La formulación global del problema de dimensionado óptimo consistirá en minimizar la siguiente función objetivo, configurada por los costes asociados a las tuberías, esto es:

$$C_i = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{ND} c_j \cdot L_{i,j}$$

Siendo:

- C_i = Coste total de las tuberías de la línea i (€)
- C_j = Coste unitario del diámetro D (€/metro lineal)
- L_{ij} = Longitud del tramo de diámetro D en la línea i (m)

La optimización del costo a través de PNL, queda definida en:



Restricciones:

- Las *restricciones* de presión mínima en cada turno 1, 2, o 3 son:

$$\sum_{i \in S_{0,m,k}} h_{f,i} = \sum_{i \in S_{0,m}} \sum_{j=1}^{ND} j_{i,j,k} \cdot L_{i,j} \leq \Delta H_{0,m,k} \quad \forall \text{ turno } k \text{ y nudo } m$$

Siendo:

- $J_{i,j,k} L_{i,j}$: Pérdida de carga (m) en la línea i, del turno k
- $S_{0,m,k}$: Conjunto de líneas pertenecientes al trayecto entre los nudos 0 y m con su respectivo turno k
- $\Delta H_{0,m,k}$: Máxima pérdida de carga admisible (m) en el trayecto comprendido entre los nudos 0 y m y el turno k que corresponda.

- Limitaciones de diámetros mínimos y máximos que deben considerar en la red,

$$25 \text{ mm} < d < 1000 \text{ mm}$$

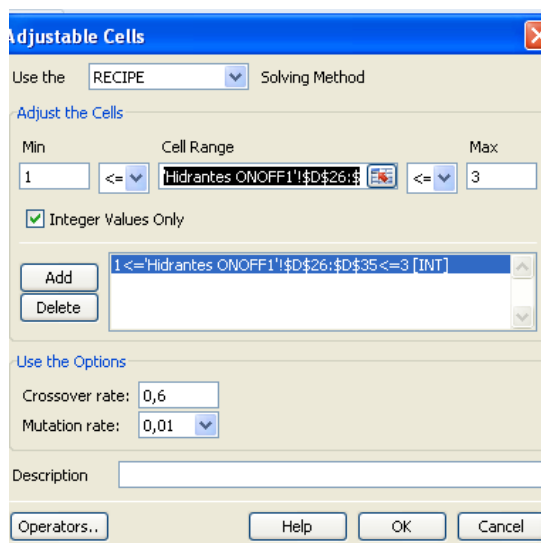
Estas restricciones serán introducidas como se observa:



3. Ensamblado del modelo de asignación de turnos, similar al literal 5, de la metodología del modelo híbrido PLYAG.
4. Combinación de hidrantes para optimizar el costo total.- Se plantean turnos al azar de los nudos con hidrantes de la red, seguido se ejecuta la macro Solviendo a través de Solver, donde se encuentran establecidas las restricciones que se considerarán en el modelo (presión en nudos, diámetros máximos y mínimos), buscando el coste mínimo, posteriormente Evolver resuelve la mejor combinación de hidrantes

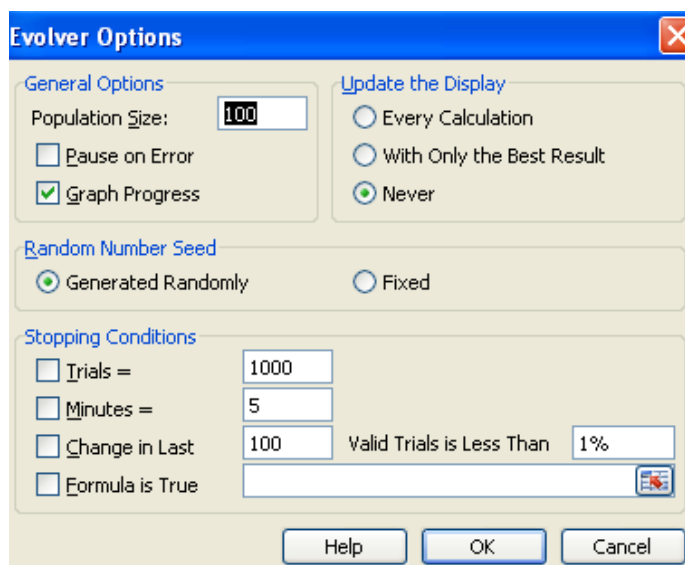
considerando las restricciones mencionadas y costo mínimo; se inicia con esto un proceso iterativo hasta encontrar el costo deseado.

Para ello, en las propiedades de “AdjustableCells”, ajuste de celdas, se señala la opción “recipe”, pues asigna un valor aleatorio comprendido entre los límites (desde 1 a 3, con valores enteros, esto es 1, 2 o 3, que son los turnos adoptados en esta red)

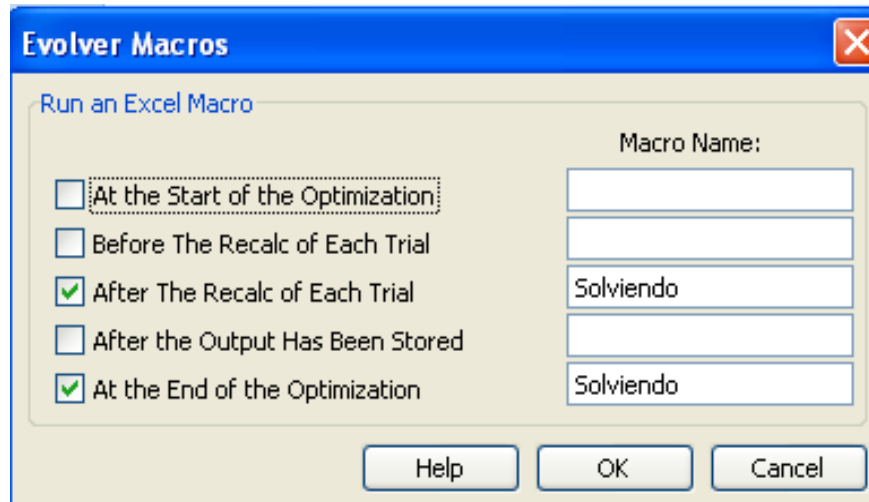


En la celda *CellRange*, se definirá las celdas en donde se encuentran ubicados los hidrantes a combinar.

En el ítem “Evolver Options”, colocamos:



Finalmente, se llama a la macro denominada Solviendo, de tal manera que con cada interacción de Evolver se ejecute la macro solviendo.



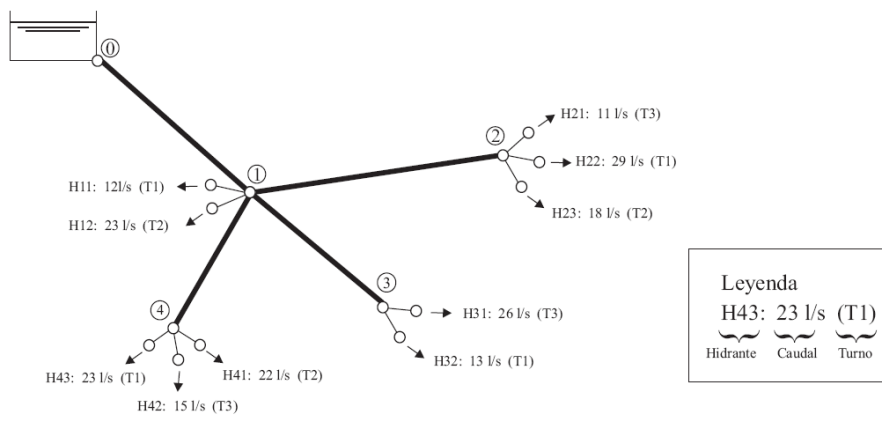
5. Se repetirán los pasos 8, y 9 de la metodología del método híbrido PLYAG

ANEXO 1.

APLICACIÓN DEL METODO A CASOS DE ESTUDIO

EJEMPLO DE UNA RED DE 4 LINEAS CON 10 HIDRANTES

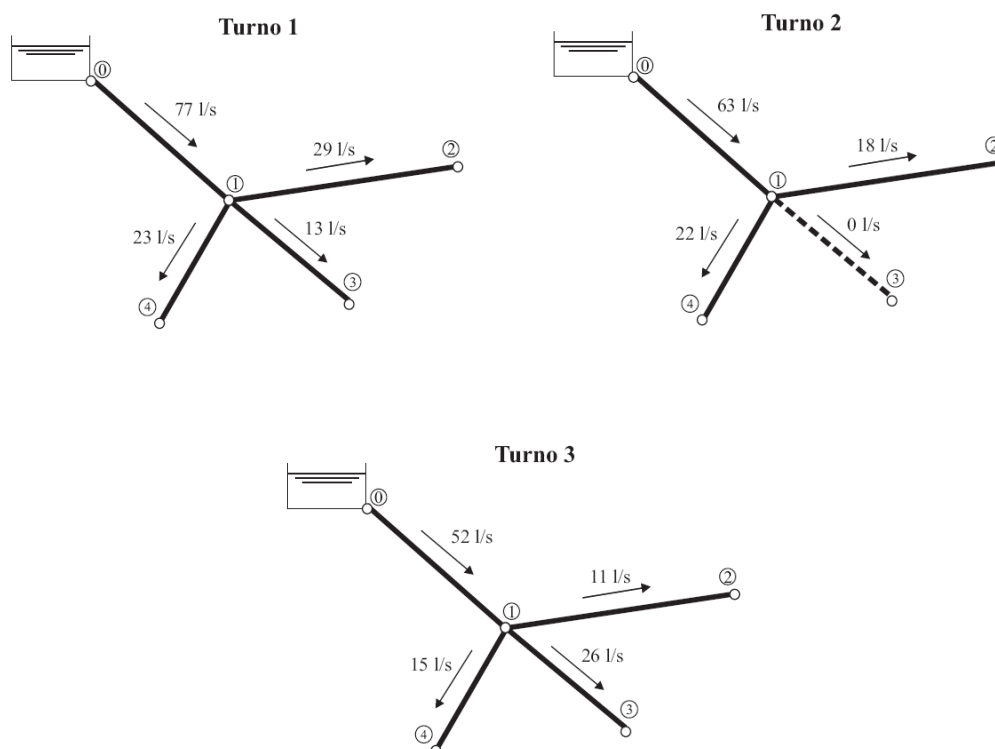
Aplicaremos la misma red para este modelo



Partimos con la información general de la red enunciada:

Viscosidad cinemática	0'000001	m ² /s
Rugosidad	0'01	mm
<u>Curva de coste de la tubería</u>		
Coeficiente A	0'0011929	
Exponente a	1'9434121	
Caudal ficticio continuo	1	l/(s.ha)
Jornada de riego	18	horas
Número de turnos	3	
Garantía de suministro	99	%

La distribución de caudales que circulan por las líneas 1, 2, 3 y 4 de la red según el turno asignado es como sigue:



Y seguimos el proceso de la metodología implementada:

9. Repetimos los pasos 1, 2 y 3 del ejemplo de cálculo de la metodología para el método híbrido PLYAG, :

10. Para aplicar el modelo de Programación no lineal armamos una hoja en Excel en donde contamos con las columnas de: líneas, cota, caudal, longitud, rugosidad, diámetro, velocidad, Reynolds, rugosidad relativa, factor de fricción, pérdidas por fricción, presión mínima, coste de tubería, altura piezométrica y presión en el nudo para cada turno considerado, como se muestra:

Turno 1															
Línea / Nudo	Cota (m)	Caudal lin. (l/s)	Longitud (m)	Rugos (mm)	Diam (mm)	v (m/s)	Re	Er	f	hf (mca)	Pmin (mca)	Coste tub (\$)	Alt. Piez (m)	Presión (m)	
0	80														
1	40	44'000	2000	0'01	244'95	0'93	228706'27	4'08E-05	0'0155	5'634	0	104,860'08	74'366	34'366	
2	30	29'000	2400	0'01	154'78	1'54	238561'57	6'46E-05	0'0156	29'366	15	51,560'79	45'000	15'000	
3	45	0'000	1200	0'01	167'64	0'00	0'00	5'97E-05	0'0000	0'000	0	30,106'54	74'366	29'366	
4	20	15'000	1500	0'01	130'73	1'12	146092'03	7'65E-05	0'0171	12'481	15	23,210'46	61'885	41'885	

El factor de fricción se ha calculado con la ecuación de Swamme y Jain, [Ec. 1.22], las pérdidas por fricción con la ecuación de Darcy.

11. El ensamble del modelo de asignación de turnos queda:

NH	Nudo	Hidr.	TURNO	Ah (ha)	Qh (l/s)	Prob_h
1	1	1	3	2'652	12'0	0'295
2	1	2	3	4'448	23'0	0'258
3	2	1	1	6'948	29'0	0'319
4	2	2	2	4'229	18'0	0'313
5	2	3	3	2'466	11'0	0'299
6	3	1	3	2'933	13'0	0'301
7	3	2	2	5'895	26'0	0'302
8	4	1	3	4'679	23'0	0'271
9	4	2	2	4'766	22'0	0'289
10	4	3	1	3'130	15'0	0'278

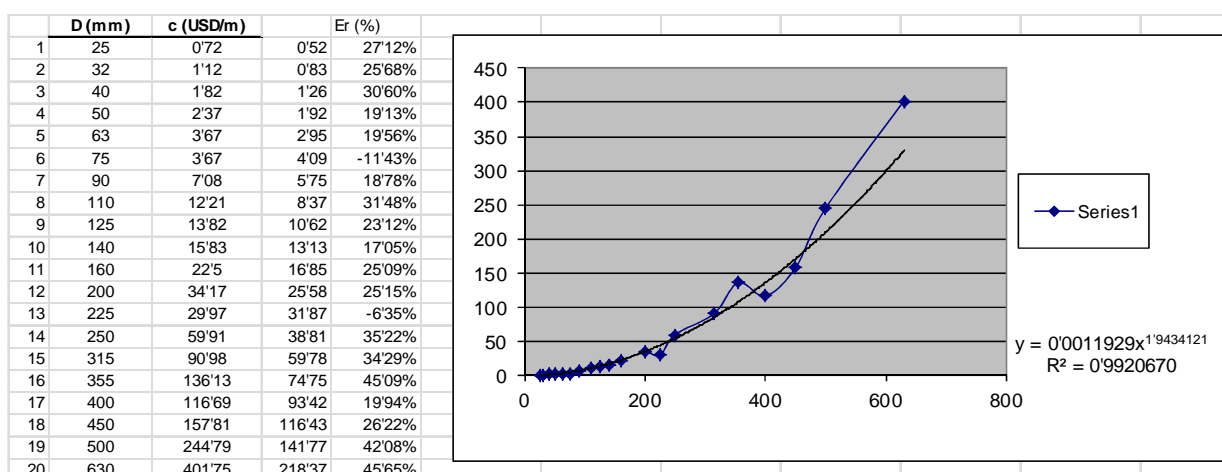
12. Posteriormente se hace el corrido del modelo con el complemento del software Evolver y éste a través de algoritmos genéticos busca la mejor solución cumpliendo las restricciones planteadas inicialmente, obteniendo los resultados del diseño como consta en el Cuadro 1, con su respectivo costo. Se asume como datos de partida:

Viscosidad cinemática	1E-06
Rugosidad	0,01

Y para la curva de coste de la tubería los siguientes datos

Curva de coste de la tubería	
Coefficiente A	0'0011929
Exponente a	1'9434121

Lo que ha resultado de trabajar con los siguientes coeficientes:



La relación obtenida para la serie propuesta en la red que nos atañe es:

$$c = 0,0011929 \cdot D^{1'9434121}$$

Cuadro 1. Resultados obtenidos con modelo PNLAYG

Turno 1														
Línea / Nudo	Cota (m)	Caudal lin. (l/s)	Longitud (m)	Rugos (mm)	Diam (mm)	v (m/s)	Re	Er	f	hf (mca)	Pmin (mca)	Coste tub (\$)	Alt. Piez (m)	Presión (m)
0	80'00													
1	40'00	44'00	2.000'00	0'01	244'95	0'93	228.706'27	0'00	0'02	5'63	0'00	104.860'08	74'37	34'37
2	30'00	29'00	2.400'00	0'01	154'78	1'54	238.561'57	0'00	0'02	29'37	15'00	51.560'79	45'00	15'00
3	45'00	0'00	1.200'00	0'01	167'64	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	0'00	30.106'54	74'37	29'37
4	20'00	15'00	1.500'00	0'01	130'73	1'12	146.092'03	0'00	0'02	12'48	15'00	23.210'46	61'88	41'88
Turno 2														
Línea / Nudo	Cota (m)	Caudal lin. (l/s)	Longitud (m)	Rugos (mm)	Diam (mm)	v (m/s)	Re	Er	f	hf (mca)	Pmin (mca)	Coste tub (\$)	Alt. Piez (m)	Presión (m)
0	80'00													
1	40'00	66'00	2.000'00	0'01		1'40	343.059'41	0'00	0'01	11'85	0'00		68'15	28'15
2	30'00	18'00	2.400'00	0'01		0'96	148.072'70	0'00	0'02	12'27	15'00		55'88	25'88
3	45'00	26'00	1.200'00	0'01		1'18	197.473'74	0'00	0'02	8'15	15'00		60'00	15'00
4	20'00	22'00	1.500'00	0'01		1'64	214.268'32	0'00	0'02	25'17	15'00		42'98	22'98
Turno 3														
Línea / Nudo	Cota (m)	Caudal lin. (l/s)	Longitud (m)	Rugos (mm)	Diam (mm)	v (m/s)	Re	Er	f	hf (mca)	Pmin (mca)	Coste tub (\$)	Alt. Piez (m)	Presión (m)
0	80'00													
1	40'00	82'00	2.000'00	0'01		1'74	426.225'32	0'00	0'01	17'69	15'00		62'31	22'31
2	30'00	11'00	2.400'00	0'01		0'58	90.488'87	0'00	0'02	5'03	15'00		57'29	27'29
3	45'00	13'00	1.200'00	0'01		0'59	98.736'87	0'00	0'02	2'31	15'00		60'00	15'00
4	20'00	23'00	1.500'00	0'01		1'71	224.007'78	0'00	0'02	27'31	15'00		35'00	15'00

Coste Total de la Solución = 209.737'87 USD
--

La presión mínima de consigna en los nudos demandantes será:

$$P_i \geq 15mca$$

Que al observar los resultados de presión luego de correr el modelo se concluye que todos los nudos de la red cumplen con la presión mínima necesaria.

Turno 1						
Línea / Nudo	Cota (m)	Caudal lin. (l/s)	Longitud (m)	Pmin (mca)	Alt. Piez (m)	Presión (m)
0	80'00					
1	40'00	44'00	2.000'00	0'00	74'37	34'37
2	30'00	29'00	2.400'00	15'00	45'00	15'00
3	45'00	0'00	1.200'00	0'00	74'37	29'37
4	20'00	15'00	1.500'00	15'00	61'88	41'88
Turno 2						
Línea / Nudo	Cota (m)	Caudal lin. (l/s)	Longitud (m)	Pmin (mca)	Alt. Piez (m)	Presión (m)
0	80'00					
1	40'00	66'00	2.000'00	0'00	68'15	28'15
2	30'00	18'00	2.400'00	15'00	55'88	25'88
3	45'00	26'00	1.200'00	15'00	60'00	15'00
4	20'00	22'00	1.500'00	15'00	42'98	22'98
Turno 3						
Línea / Nudo	Cota (m)	Caudal lin. (l/s)	Longitud (m)	Pmin (mca)	Alt. Piez (m)	Presión (m)
0	80'00					
1	40'00	82'00	2.000'00	15'00	62'31	22'31
2	30'00	11'00	2.400'00	15'00	57'29	27'29
3	45'00	13'00	1.200'00	15'00	60'00	15'00
4	20'00	23'00	1.500'00	15'00	35'00	15'00

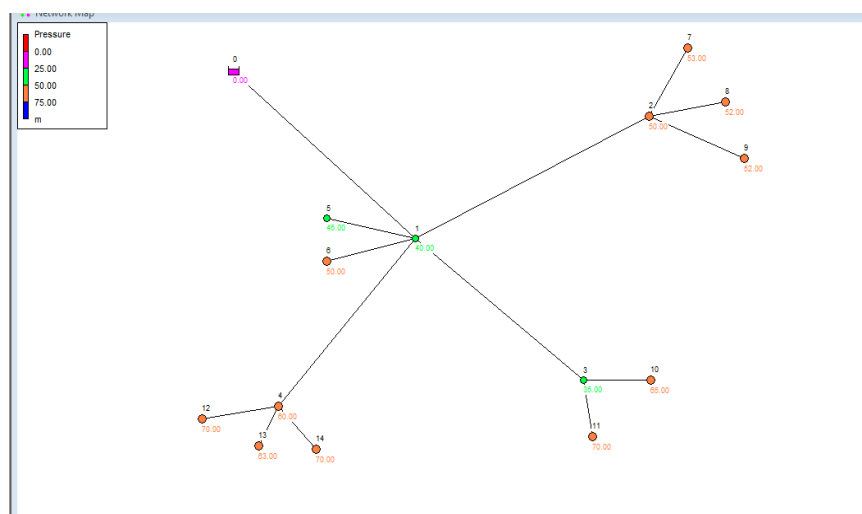
Resolviendo el modelo híbrido **PPLYAG**, con la combinación óptima de hidrantes para un coste mínimo, la red queda configurada con la siguiente disposición de turnos en los nudos donde se encuentran ubicados los hidrantes:

NH	Nudo	Hidr.	TURNO
1	1	1	3
2	1	2	3
3	2	1	1
4	2	2	2
5	2	3	3
6	3	1	3
7	3	2	2
8	4	1	3
9	4	2	2
10	4	3	1

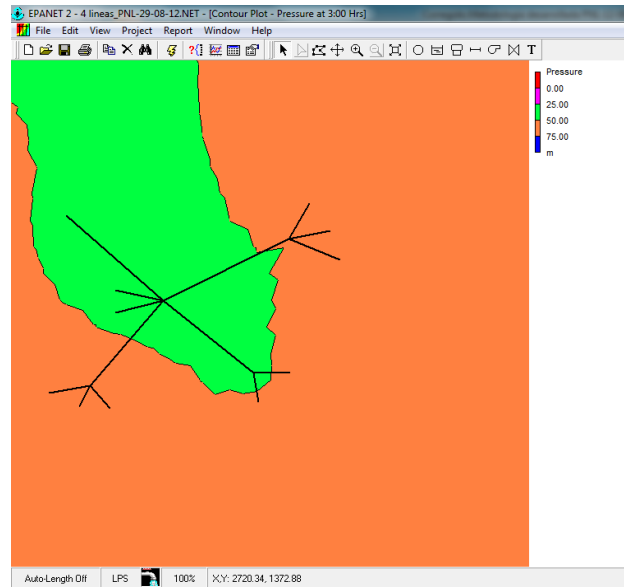
La distribución de hidrantes con sus respectivos caudales circulantes en cada turno, y el coste total, resulta:

							Q TT1	Q TT2	Q TT3	SQTT
							44	66	82	192
NH	Nudo	Hidr.	TURNO	Ah (ha)	Qh (l/s)	Prob h	Q T1	Q T2	Q T3	
1	1	1	3	2'652	12'0	0'295	0	0	12	
2	1	2	3	4'448	23'0	0'258	0	0	23	
3	2	1	1	6'948	29'0	0'319	29	0	0	
4	2	2	2	4'229	18'0	0'313	0	18	0	
5	2	3	3	2'466	11'0	0'299	0	0	11	
6	3	1	3	2'933	13'0	0'301	0	0	13	
7	3	2	2	5'895	26'0	0'302	0	26	0	
8	4	1	3	4'679	23'0	0'271	0	0	23	
9	4	2	2	4'766	22'0	0'289	0	22	0	
10	4	3	1	3'130	15'0	0'278	15	0	0	
Coste							209,737'87	USD		

13. Simulando el modelo en Epanet, observamos la fluctuación de las presiones en los nudos demandantes.



En la figura se ha simulado las presiones de trabajo en el tercer turno, las mismas que se encuentran en el rango de 0 a 75 mca. Luego en un mapa de contorno presiones se observa:



5. CONCLUSIONES

A continuación se narra los principales aportes en este trabajo de investigación:

Se ha planteado dos metodologías para combinar en forma óptima la asignación de turnos de los hidrantes de redes de riego funcionando con la modalidad de turnos, que nos permitan obtener el costo mínimo de diámetros de tuberías que intervendrán directamente en el diseño, una que fusiona la programación lineal y algoritmos genéticos y la segunda que combina programación no lineal y algoritmos genéticos de tal manera que los resultados además cumplan las prestaciones de servicio en cuanto a presión, caudal y velocidad apropiados con equilibrio energético. En los casos de estudio en donde se implementaron los modelos híbridos, se obtiene una disminución del costo en diámetros diseñados de hasta 50 %, con respecto a hacer funcionar la red a la demanda. Se confirma entonces varias hipótesis planteadas por investigadores que manifiestan que los sistemas de riego que funcionan por turnos son más económicos con respecto a los que trabajan a la demanda.

En el modelo híbrido que incluye programación no lineal y algoritmos genéticos se obtiene un coste total menor debido a que en la selección de diámetros se utiliza una gama de tuberías continua, en tanto que en la programación lineal y algoritmos genéticos se considera diámetros comerciales únicamente.

A través de la implementación de un modelo de control (sistema de adquisición de datos), fue posible evaluar el funcionamiento de un sistema de riego a pequeña escala en donde se utilizó diferentes tipos de emisores, logrando auditar presiones y caudales. Se determinó que los coeficientes de variación de fabricación se encuentran en las categorías A y C, evidenciando no homogeneidad en las características de los mismos, lo que permitirá en lo posterior determinar la conveniencia o no de utilizar estos dispositivos en las labores de riego en la región.

En este desarrollo se ha usado soporte informático que facilitó la labor emprendida, por lo tanto se complementará este trabajo con la ejecución de un curso on-line en donde se impartirá todos los aspectos relacionados a los software usados en este trabajo, dirigido a profesionales que se encuentren involucrados en esta área de la ingeniería.

6. TRABAJOS FUTUROS

En nuestra región la modalidad de riego más regular es la que se realiza por turnos, por lo tanto se propone continuar con el desarrollo de este tipo de modelos que permitan manejar el recurso económico de forma óptima, como también las variables hidráulicas en forma eficiente.

Otro camino que necesita explorarse es la implementación de sistemas de bombeo en los modelos híbridos desarrollados; puesto que, son muy frecuentes en nuestro medio debido a la topografía irregular de esta región.

Con respecto al monitoreo en situ de las redes de riego en nuestra región, constituye el primer paso para auditar variables hidráulicas, siendo necesario completar con la automatización de redes que nos permitan el manejo oportuno, eficiente y global de estos sistemas, así como también facilitarán el trabajo de quienes se encuentran inmensos en las tareas de riego.

7. REFERENCIAS

Aliod R., García S., Peña J., Seral P. (2010). *Curso: “Aplicación práctica del software Gestar 2010, para el diseño, gestión hidráulica y energética de redes de riego a presión”*. Criterios generales de diseño de redes a presión - Universidad de Zaragoza. Grupo Gestar. Huesca.

Alperovits, E. and Shamir, U. (1977), “Design of Optimal Water Distribution Systems”, *Water Resources Research*, Vol. 13, 6 (Diciembre), pp. 885-900.

Apollin, F. y Eberhart, C. (1998). “Sistema de capacitación para el manejo de los recursos naturales Renovables”. *Riego Andino*. CESA. “Metodologías y análisis del diagnóstico de sistemas de riego campesino”. CAMAREN. Quito-Ecuador
http://www.asocam.org/biblioteca/R0107_completo.pdf

Arregui, F., Cabrera R., E. y Cobacho, R. (2007). “Gestión Integral de Contadores de Agua”. *Instituto Tecnológico del Agua*. Universidad Politécnica de Valencia (España). ISBN 84-608-0539-5, pp.16-20

Arroyo, J. (2000). *Modelos y algoritmos para la explotación óptima de la generación en sistemas eléctricos centralizados y competitivos mediante algoritmos genéticos y programación lineal entera – mixta*. Tesis Doctoral. Ciudad Real. Universidad de Castilla-La Mancha. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática. pp. 228

Arviza, J.(2007). “Rg y Epanet”, *Un manual para sacar partida a ambas aplicaciones*. Universidad Politécnica de Valencia.

(<http://www.etsmre.upv.es/dira/Imagenes/files/Dimensionado%20con%20Rg%20y%20Epanet.pdf>)

Arviza, J. y Balbastre I. s/f. “Redes colectivas de riego”. *Problemática general. Resolución de conflictos*. Dpto. Ingeniería Rural y Agroalimentaria. Universidad Politécnica de Valencia. <http://www.ivia.es/sdta/pdf/revista/tecnologia/25tema09.pdf>

AitKadi, M., Abdellaoui, R., Oulhaj A. and Essafi B. 1990. *Design of Large-scale Collective SprinklerIrrigation Projects for On Demand Operation: A Holistic Approach*. Vol. 1d.XIV Congress of ICID, Rio de Janeiro, Brazil. pp. 59-78.

Baños, R. (2006). *Meta-herísticas Híbridas para optimización. Mono-bjetivo y Multi-objetivo. Paralelización y Aplicaciones. (Tesis de Doctorado). Universidad de Almería.*

Bhave, P.R. (1979). "Selecting Pipe Sizes in Network Optimization by Linear Programming". *Journal of the Hydraulics Division (ASCE)*, Vol. 105, HY7, pp. 1019-25

Cabrera, E., Espert, V., García-Serra, J., Martínez, F. (1996). "Ingeniería Hidráulica Aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua". *UD Mecánica de Fluidos. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. España. Vol. 1, pp. 2-20.*

Cabrera, E., Espert, V., García-Serra, J., Martínez, F. (1996). "Ingeniería Hidráulica Aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua". *UD Mecánica de Fluidos. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. España. Vol. 2, pp. 607-610.*

Calvo, R., et al. (2009). "Organización de turnos para la optimación energética de redes colectivas de riego a presión". (Agua y Energía). *Jornadas de Ingeniería del Agua, España. http://oa.upm.es/5718/1/INVE_MEM_2009_70546.pdf*

Calhoun, C.A. (1970). "Optimization of Pipe Systems by Linear Programming", *Proc. On Control Flow in Closed Conduits, Ed. J. P. Tullis, Colorado State Univ. Fort Collins CO (EEUU), pp. 175-192*

Clement, R. y Galand, A. (1986). "El riego por aspersión y las redes colectivas de distribución a presión". *Editores Técnicos Asociados.*

Castillo, E., Conejo, A. J., Pedregal, P., García, R., Alguacil, N. (2002). *Formulación y Resolución de Modelos de Programación Matemática en Ingeniería y Ciencia.*

Davies, T.E. and Principe, J.C. (1991). "A Simulated Annealing Like Convergence Theory for the Simple Genetic Algorithm". *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms, pp. 174-181 San Mateo, California (USA).*

De Jong K.A. (1975). *An analysis of the behaviour of a class of genetic adaptive systems.* Tesis doctoral, University of Michigan

Dillon, K. Edwin, Kochs, E., Tand, R. (1978). “Integer Programming Approach to the Problem of optimal unit Commitment with probabilistic Reserva Determination”. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. Vol. PAS – 97, No. 6, pp. 2154 – 2166.

FAO-Forestry, (2000). *Sistema de Información sobre el Uso del Agua en la Agricultura y el Medio Rural de la FAO*

http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/ecuador/indexesp.stm

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO).(2000). *Irrigation in Latin America and the Caribbean in figures.* Ed.FAO.Roma. 2000. 348 p.

http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/factsheets/aquastat_fact_sheet_ecu_es.pdf

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO).2012. *Sistema de Información sobre el Uso del Agua en la Agricultura y el Medio Rural de la FAO.*

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO).2007, Steduto, P. (2007).
<http://www.eldiario.com.ec/noticias-manabi-ecuador/30347>

Fuertes, V.S., García-Serra, J., Iglesias, P.L., López, G., Martínez, F.J. y Pérez, R.(2002). “Modelación y diseño de redes de abastecimiento de agua”. *Grupo de Mecánica de Fluidos. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. España. pp. 2-20.*

GalárragaR. (2001). *Estado y gestión de los recursos hídricos en el Ecuador.*
<http://tierra.rediris.es/hidrored/basededatos/docu1.html>

García, D. (2010). *Municipios Rurales y Gestión Local Participativa en zonas de Montaña, Ponencia: Manejo y Gestión del agua: caso de Ecuador.*

Gil, N. (2006). “Algoritmos genéticos”. *Universidad Nacional de Colombia. Escuela de Estadística. SedeMedellín.*

Gil, C., Ortega, J., Daz, A.F., Montoya, M.G., *Annealing-based Heuristics and Genetic Algorithms for Circuit Partitioning in Parallel Test Generation, Future Generation Computer Systems* 14(5), 1998, pp. 439-451.

Goldberg, D.E.(1989). “*Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*”. Addison-Wesley. Reading, Massachusetts (USA).

González, P. (2007). “*Introducción al riego y drenaje*”. Instituto de Investigaciones del Riego y Drenaje. Cuba 2007.

González, F. (2010). “*Ubicación óptima de hidrantes multiusuario en redes de riego a presión mediante el empleo del modelo de localización – asignación*”. (Tesis de Master). Universidad Politécnica de Valencia. España.

Granados, A. (1990). *Redes colectivas de riego a presión*. E.T.S.I.C.C. y P., Universidad Politécnica de Madrid.

Hobbs, W. (1988). Hermon, Warner, G. Sheblé. “*An Enhanced Dynamic Programming Approach for Unit Commitment*”. *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 3, No. 3, pp. 1201 – 1205.

Holland, J.H. (1975). “*Adaptation in Natural and Artificial Systems*”. University of Michigan Press. Ann Arbor (USA).

Hurtado L.–*Fundamentos del riego*. Universidad Nacional Agraria La Molina. Facultad de Agronomía. pp. 5-12.

http://grupos.emagister.com/documento/fundamentos_del_riego/23016-480140

INERHI-PREDESUR-CONADE. s/f. *Plan de desarrollo de los Recursos Hídricos de la Provincia de Loja* (on line).

<http://www.oas.org/dsd/publications/unit/oea028.htm#TopPage> (1994)

IRYDA, (1985). “*Normas para proyectos de riego por aspersión*”. *Series de Ingeniería Rural y Desarrollo Agrario. Manual Técnico No 3*. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación.

Karmeli, D., Gadish, Y. and Meyers, S. (1968). "Design of Optimal Water Distribution Networks", *Journal of the Pipeline Division (ASCE)*, Vol. 94, PL1, pp. 1-10.

Labye, Y. (1966), "Etude des Procédés de Calcul Ayant Pour But de Rendre Minimal le Coût d'un Réseau de Distribution d'Eau Sous Pression", *La Houille Blanche*, No 5 (Mayo), pp. 577-583.

Lamaddalena, N. y Sagardoy, J.A. (2000). "Performance Analysis of on-demand pressurized irrigation systems". *FAO Irrigation and drainage. Water Resources. Paper. 59. Development and Management Service FAO Land and of Water Development Division. Roma.*

Lamaddalena N. 1997. *Integrated simulation modeling for design and performance analysis of ondemand pressurized irrigation systems. Ph.D. Dissertation. Technical University of Lisbon, Lisbon.*

Lansey, K.E. y Mays, L.W. (1989), "Optimization Model for Water Distribution System Design", *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, Vol. 115, 10 (Octubre), pp. 1401-1418.

Lara, B. (2007). "Diseño de redes colectivas de riego: Estudio de la asignación óptima de caudales mediante algoritmos genéticos". (Tesis de Doctorado). *Universidad Politécnica de Valencia. España.*

Lee F. (1988) "Short-term Thermal Unit Commitment – A New Method". *IEEE Transactions on Power Systems. Vol.3, No. 2, p 113 – 119.*

Liotta M., s/f. *Los sistemas de riego por goteo y microaspersión.*

<http://es.scribd.com/doc/39687895/Sistemas-de-riego-por-goteo-y-microaspersion>

Macías, M., Vergara, M., Macías, V., Bazurto, M. (2011). *Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ingeniería Agrícola, (Tesis de grado). Adaptación e instalación de un sistema de riego por aspersión, para cultivos comerciales establecidos en la comunidad El Milagro del cantón Portoviejo.*

<http://repositorio.utm.edu.ec/bitstream/123456789/264/1/tesis%20final%20riego%20aspersion%20pdf.pdf>

Martinez, J., Fuertes, V.S., Pérez, G.R. (2009). *Curso: Hidráulica Avanzada, Capítulo 2: Cálculo Hidráulico de Tuberías. Master en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. España. pp. 3-8*

Martínez, F., Sanz, F., García-Serra, J., Cerrillo, J.L.(1987). “Dimensionado Óptimo de Redes Ramificadas de Distribución de Agua por Programación Lineal”, *Tecnología del Agua, No 40, pp. 73-90*

Michalewicz, Z., Janikow, C.Z. (1991). “Handling Constraints in Genetic Algorithms”.*Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms, pp. 151-157 San Mateo, California (USA).*

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino – Tarragona.s/f. “Mejora del riego para la reutilización de aguas residuales en la zona de Torrents de Valls (Tarragona)”. *Cálculo de las redes de riego.*

http://www.magrama.gob.es/eu/agua/participacion-publica/anejo_6_tcm9-9895.pdf

Montiel, M., et al.(2010). “Diseño y sectorización de la operación de una red colectiva de riego mediante bloques estandarizados por gasto y superficie”. *XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Uruguay.*

Mora, D.; et al. (2010). “Diseño de redes de agua aplicando técnicas evolutivas”. *XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Uruguay*

Orth, H.M. (1986), *Model-Based Design of Water Distribution and Sewage Systems.Ed.Johm Wiley & Sons, Chichester (Reino Unido).*

Paya, I. (2007). “Optimización heurística de pórticos de edificación de hormigón armado”.(Tesis de Doctorado). *Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil. Universidad Politécnica de Valencia.*

Pérez, R. (1993). “Dimensionamiento óptimo de redes de distribución de agua en redes ramificadas considerando los elementos de regulación”. (Tesis de Doctorado). *Universidad Politécnica de Valencia. España.*

Planells, P., Ortega, J.F., Valiente, M., Montero, J. y Tarjuelo, J.M.(1999). *Ingeniería del Agua “Criterios para diseños de redes colectivas de riego”*, Vol. 6 Num.1. pp. 27-36

<http://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/2855/1/61article2.pdf>

Pleban, S. y Amir, I. (1981). “An Interactive Computerized Aid for the Design of Branching Irrigation Networks”, *Transactions of the ASAE (American Society of Agricultural Eng.)*, Vol. 24, 2, pp. 358-361.

Reeves, C. (1993). *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*, Blackwell Scientific Publications.

Robinson, R.B. y Austin, T. A. (1976). “Cost Optimization of rural water systems”, *Journal of the Hydraulics Division (ASCE)*, Vol. 102, HY8, pp. 1119-34

Salas, A., Perez, L., (2007). *Open Course Ware. Universidad de Sevilla. Curso on line: Hidráulica y Riegos.*

http://ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/Course_listing

Solera, A., Fullana, V., (2001). *Riegos y Drenajes. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Escuela Técnica superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. U.P.V. Universidad Politécnica de Valencia.* pp. 44-50.

Stephenson, D. (1981). “*Pipeline Design for Water Engineers*”.(2^a ed.), Elsevier, Amsterdam (Holanda). (2.3.39)

Tapia, F., Osorio, A.(1999). “*Conceptos sobre diseño y manejo de riego presurizado*”. Comisión Nacional de Riego. Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
http://www.siar.cl/docs/conceptos_riego_presurizado.pdf

Tarjuelo, M. B., (2005). “*El Riego por aspersión y su tecnología*”. Mundi-Prensa. Madrid España. 3^{ra}. edición.

Universidad Técnica del Norte, Agricultura y Ganadería del Ecuador
(<http://es.scribd.com/doc/56603035/AGRICULTURA-Y-GANADERIA-DEL-ECUADOR>)

Medina, J. Quintana V., Conejo, A. (1999). "A New Clipping – Off Interior – Point Technique for Medium – Term Hydro – Thermal Coordination".IEEE transactionsonPowerSystems.Vol. 14, No. 1, pp. 266 – 273.

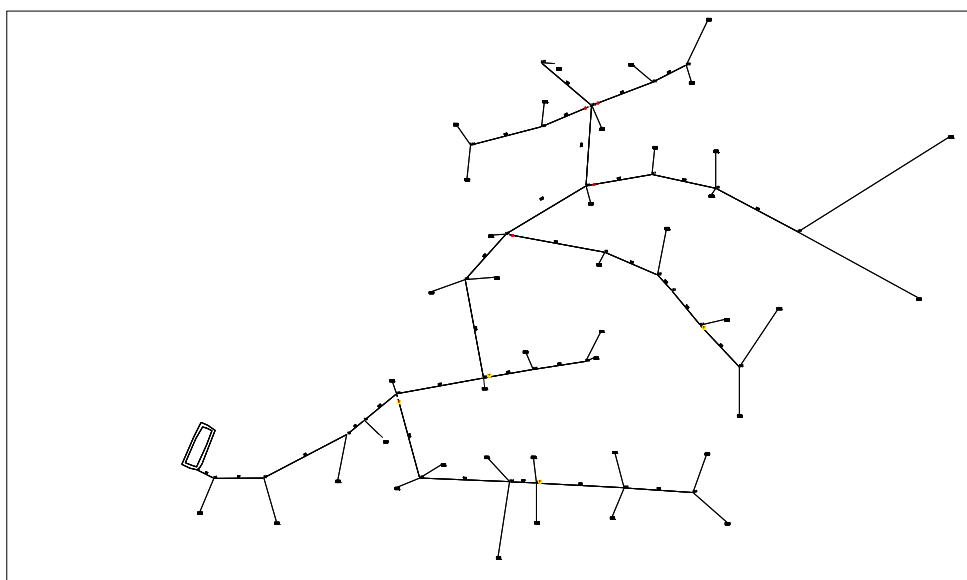
Montiel M.; et al. (2010, Noviembre). "Diseño y sectorización de la operación de una red colectiva de riego mediante bloques estandarizados por gasto y superficie". Trabajo presentado en el XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Uruguay.

ANEXO A: SISTEMA DE RIEGO TUNCARTA

UBICACIÓN:

La comunidad de Tuncarta, está ubicado en la provincia de Loja, Cantón Saraguro, Parroquia Saraguro. Con una altura promedio de 2.503 a 2.344 m.s.n.m., el centro de la comunidad se encuentra las coordenadas 699200 E y 9567600 N (en coordenadas WGS84) aproximadamente.

La red está conformada por 41 hidrantes y 30 líneas, y consideraremos tres turnos, con un tiempo total de riego de 4 horas por turno.



ÁREA DEL PROYECTO:

El área del proyecto está alrededor de 58,10 ha

LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO:

Los datos del levantamiento topográfico fueron suministrados por la empresa pública RIDRENSUR del Gobierno Provincial de Loja.

Se realizará la modelación dinámica de la red para observar el comportamiento de las variables a lo largo del tiempo.

Análisis de la red Tuncarta luego de aplicar la metodología PNLVAG

Con la implementación del modelo PNLVAG, la combinación de hidrantes resultante es:

NH	Nudo	Hidrante	TURNO	Ah (ha)	Qh (l/s)
1	96	1	3	0'177	0'184
2	97	1	2	0'974	1'013
3	98	1	2	0'317	0'330
4	99	1	1	4'937	5'134
5	100	1	3	0'544	0'566
6	101	1	2	0'197	0'205
7	102	1	2	0'729	0'759
8	103	1	2	1'610	1'674
9		2	3	1'610	1'674
10	104	1	1	0'956	0'994
11		2	2	0'956	0'994
12	105	1	1	2'054	2'136
13		2	1	2'054	2'136
14	106	1	2	1'224	1'273
15		2	2	1'224	1'273
16	107	1	2	0'778	0'809
17		2	2	0'778	0'809
18	108	1	3	0'844	0'878
19		2	2	0'844	0'878
20	109	1	1	3'738	3'888
21		2	3	3'738	3'888
22	110	1	1	0'543	0'565
23	111	1	1	0'946	0'984
24	112	1	2	0'599	0'623
25	114	1	2	0'365	0'379
26	115	1	1	2'952	3'070
27		2	3	2'952	3'070
28	116	1	1	1'148	1'194
29	117	1	2	0'808	0'840
30	118	1	3	0'584	0'608
31		2	1	0'584	0'608
32	119	1	2	5'513	5'733
33		2	3	5'513	5'733
34	120	1	1	0'339	0'353
35	121	1	2	0'844	0'877
36	122	1	3	1'054	1'096
37		2	2	1'054	1'096
38	123	1	1	0'466	0'485
39	124	1	1	0'549	0'571

40		2	3	0'549	0'571
41	125	1	1	0'451	0'469

Detallaremos el análisis hidráulico de la red para evaluar su desempeño:

✓ **Caudales**

Como se muestra en la figura los caudales que trasiegan las tuberías que se han resultado de la implementación del modelo PNLVAG. Y miramos que en el tramo inicial es aquel que va a conducir mayor cantidad de flujo, así como también aquellos tramos en donde existe mayor área de riego.

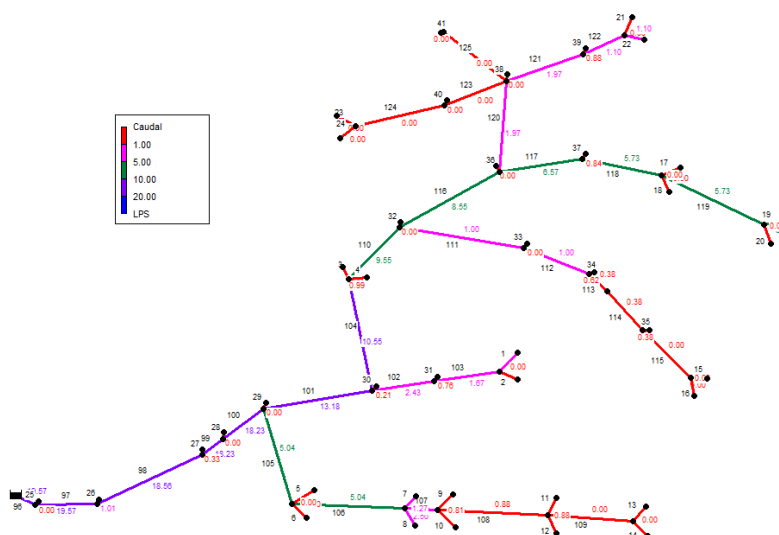


Fig. A-1. Distribución de caudales al finalizar el primer turno, a la hora 4.

De igual manera como se observa en la figuras: A-2, A-3, y A-4 la distribución de caudales en las horas, 4 8 y 12 respectivamente.

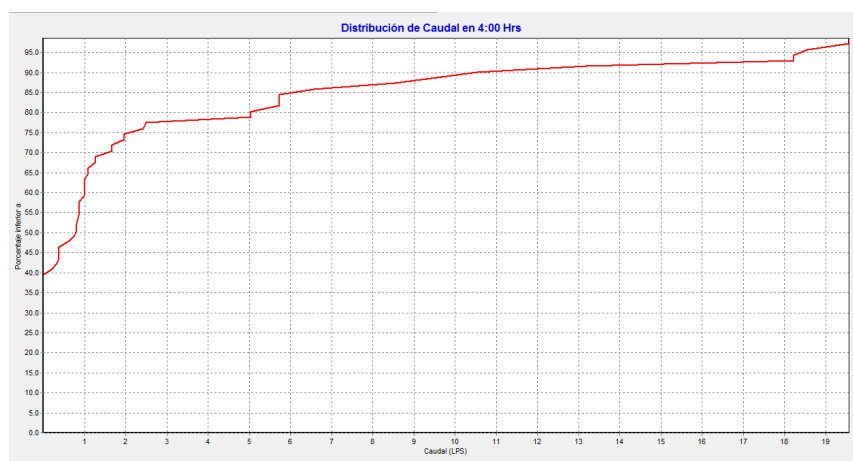


Fig. A-2 Evolución de caudal al finalizar primer turno

Se muestra en la gráfica que el 85 % de tuberías trasiegan un caudal por debajo de 6 l/s, el 10 % de tuberías por debajo de 18 l/s.

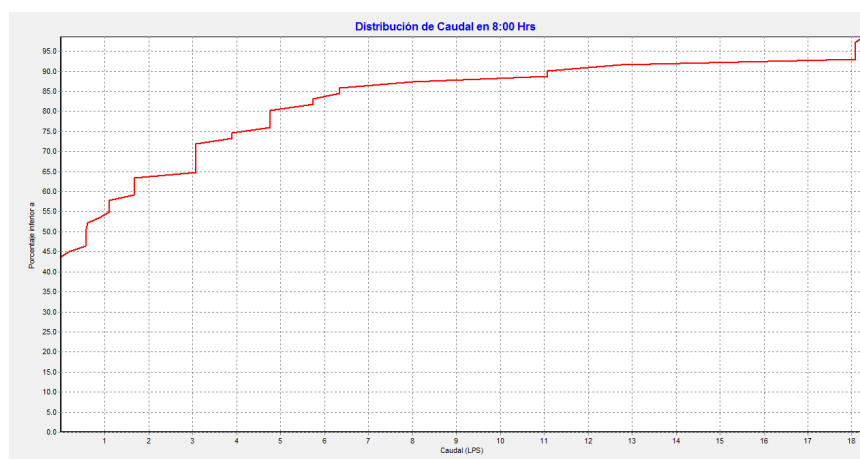


Fig. A-3 Evolución de caudal al finalizar segundo turno

Se muestra en la gráfica que el 85 % de tuberías trasiegan un caudal por debajo de 6 l/s, el 10 % de tuberías por debajo de 18 l/s.

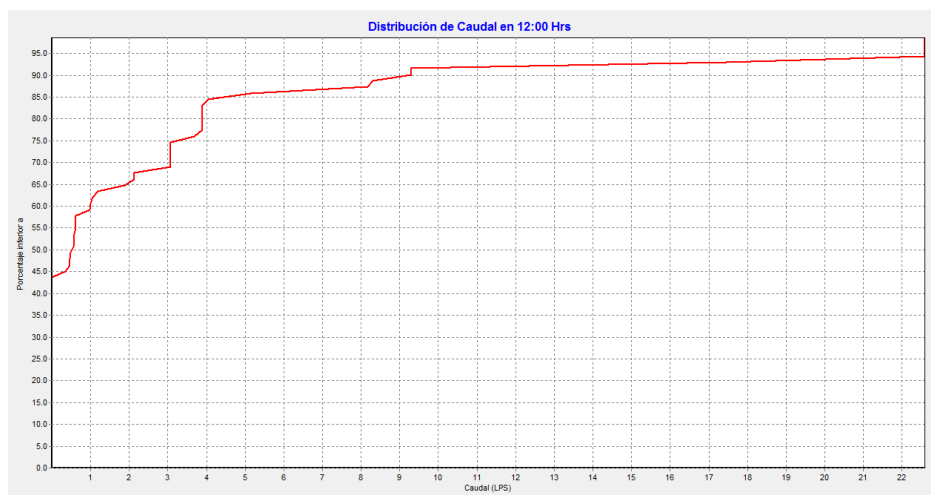


Fig. A-4 Evolución de caudal al finalizar tercer turno

Se muestra en la gráfica que el 85 % de tuberías trasiegan un caudal por debajo de 4 l/s, el 10 % de tuberías por debajo de 22 l/s.

La homogeneidad de turnos, se encuentra visible en la distribución de caudales en las imágenes que en donde se observa que el caudal producido es igual que el caudal consumido, en la implementación del modelo.

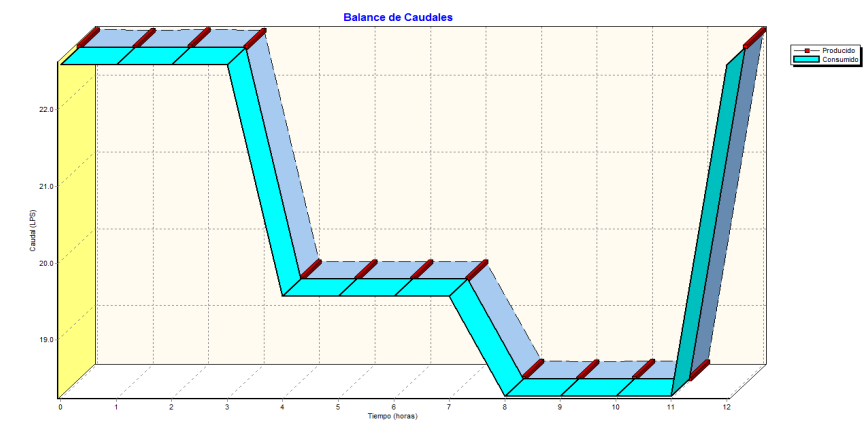


Fig. A-5 Balance de caudales en la red.

✓ **Velocidad.**

Luego de simular el modelo de la red de riego para los tres turnos, se observa que los valores de velocidad se encuentran dentro de los niveles que se observan en la figura

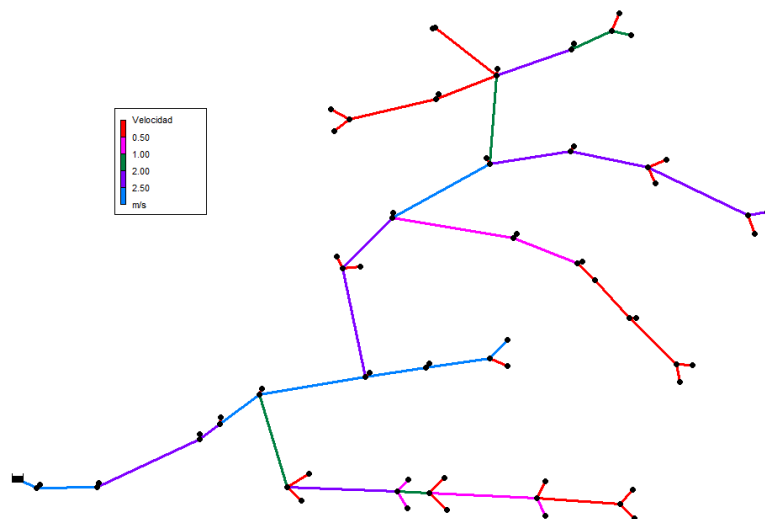


Fig. A-6 Distribución de velocidad a la hora 4ta.

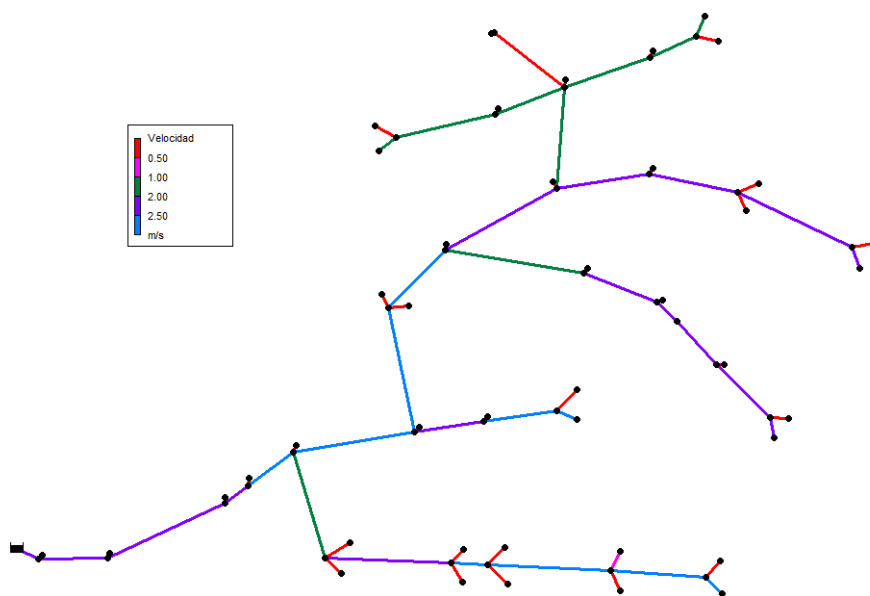


Fig. A-7 Distribución de velocidad a la hora 8.

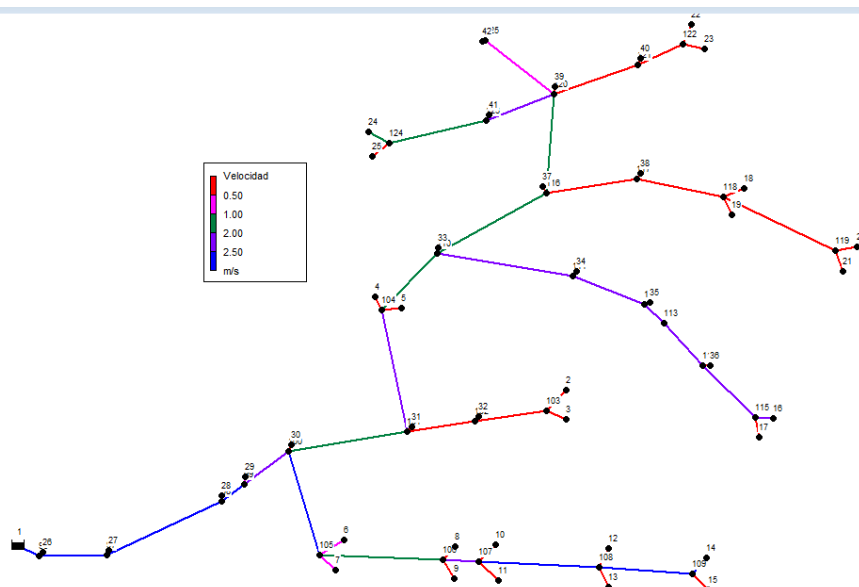


Fig. A-8 Distribución de velocidad a la hora 12.

Se presenta en el gráfico siguiente la curva de distribución de velocidades:

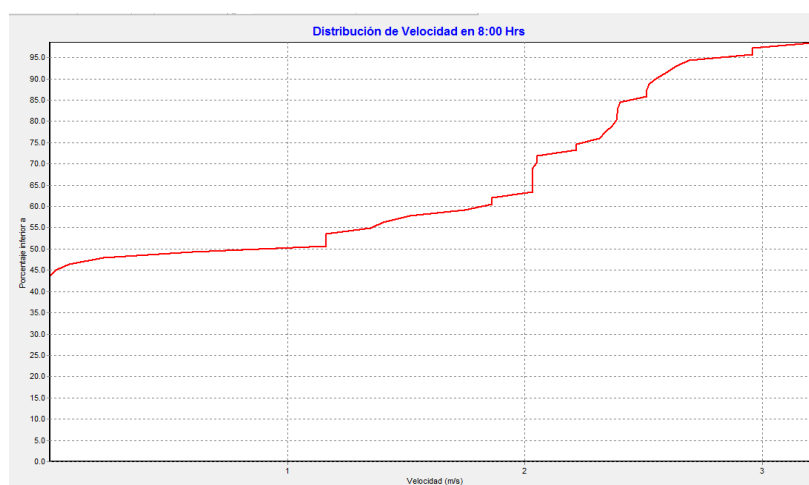


Fig. A-9 Distribución de velocidad a la hora 8

La curva de distribución de velocidades en la hora 8, muestra que el 50 % de las tuberías funcionan con velocidades inferiores de 1,2 m/s, el 15 % por debajo de 2 m/s y el 40 % por debajo de 3 m/s, siendo aceptable esta distribución que nos permitirá un margen de pérdidas aceptable.

✓ **Pérdidas de carga y alturas piezométricas**

Es importante evaluar el valor de pérdidas de carga que se producirán en la red, para tomar las precauciones necesarias. En la figura se puede observar los valores de pérdida de carga que se producen en la red a la hora doce, terminando el tercer turno, que se encuentran en los rangos que se muestran:

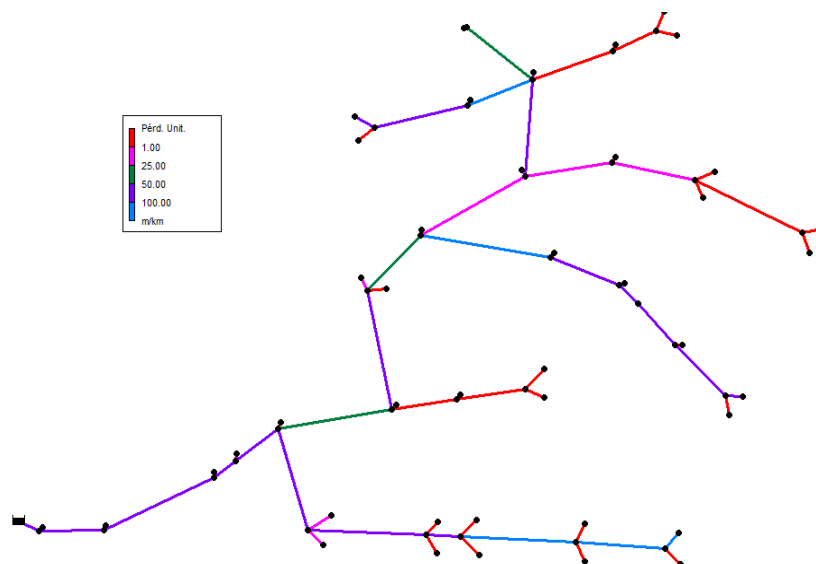


Fig. A-10 Pérdidas de carga a la hora 12

Representamos en una curva de distribución de pérdidas, la evolución de este parámetro:

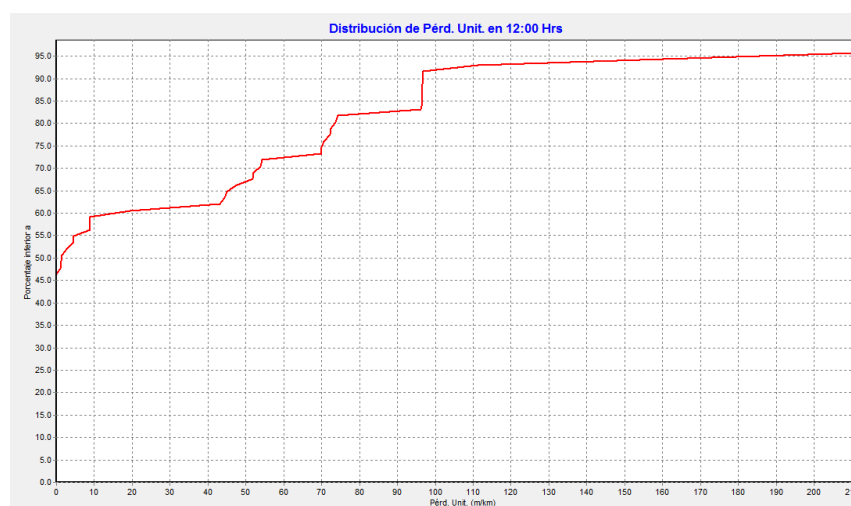


Fig. A- 11 Pérdida de carga a la hora 12

Se mira en la figura que el 60 % de tuberías tienen una pérdida inferior a 10 m/km, el 40 % de tuberías una pérdida inferior a 98 m/km.

Luego la evolución de alturas piezométricas en los nudos de la red, a la hora 12, es:

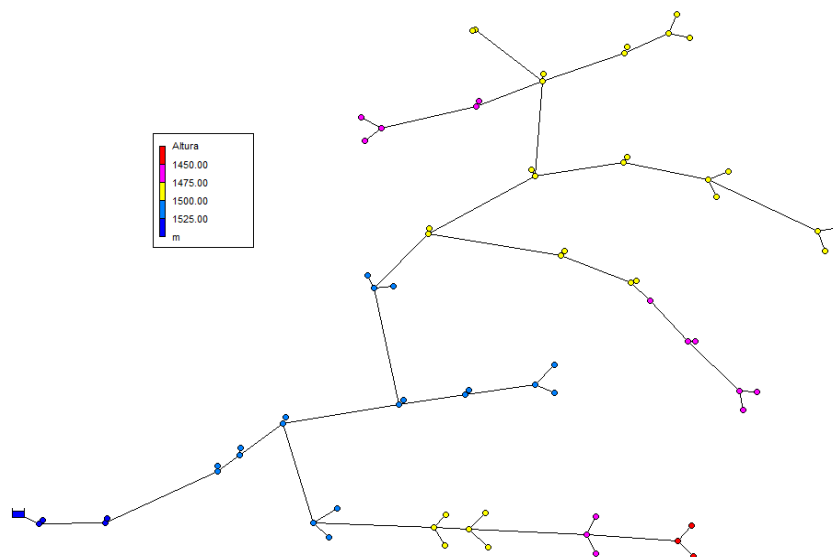


Fig. A-12 Alturas piezométricas a la hora 12

Representamos la evolución de alturas piezométricas, en los nudos de la red en las horas 4, 8 y 12

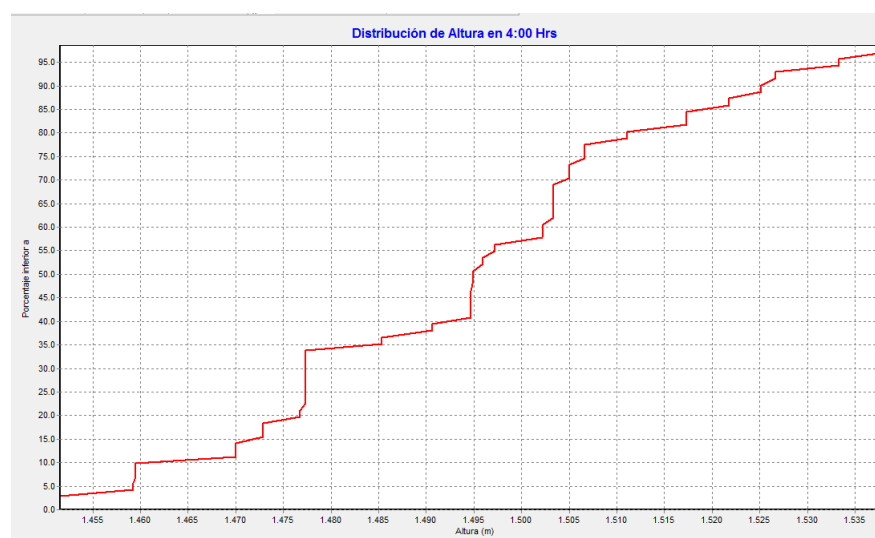


Fig. A- 13 Evolución de alturas piezométricas a la hora 4

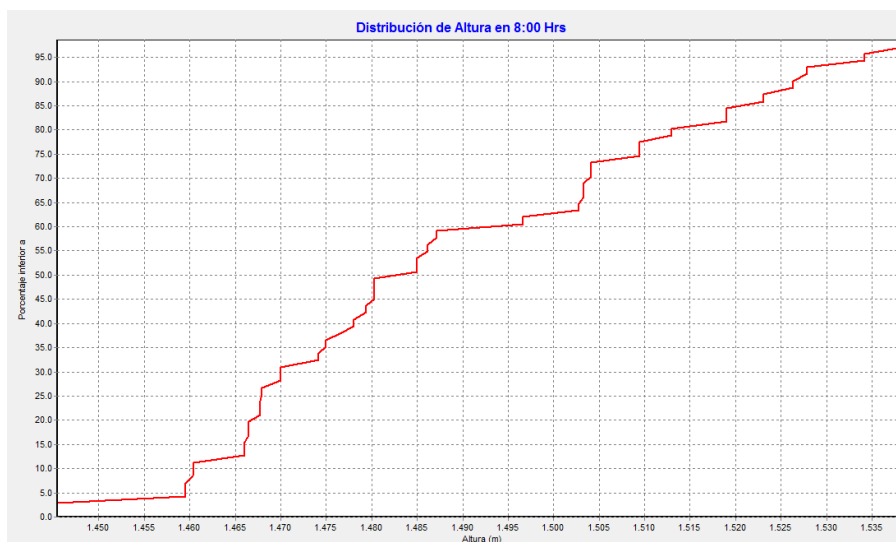


Fig. A-14 Evolución de alturas piezométricas a la hora 8

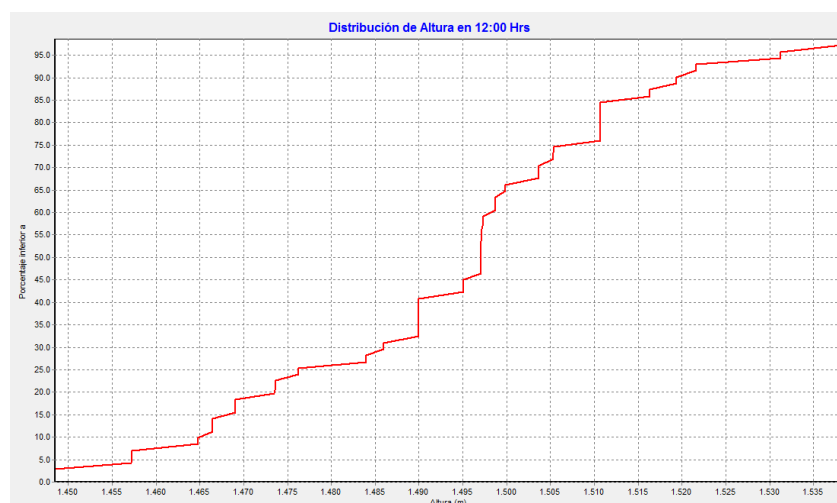


Fig. A-15 Evolución de alturas piezométricas a la hora 12

✓ Presión

Analizando la presión que es una variable fundamental en el buen funcionamiento de la red, se muestra a continuación en la figura siguiente los horizontes de presión de los nudos demandantes en la red.

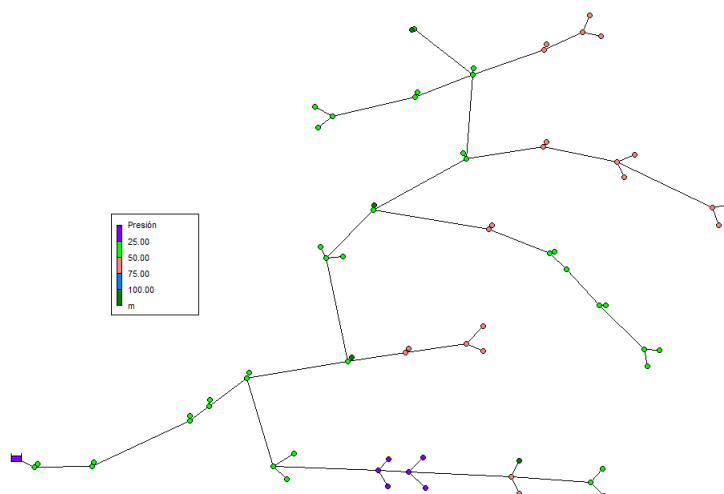


Fig. A-16 Presión en los nodos de la red a la hora 12

La distribución de presiones que miramos a continuación permite evaluar este parámetro en los nodos demandantes de la red en estudio.

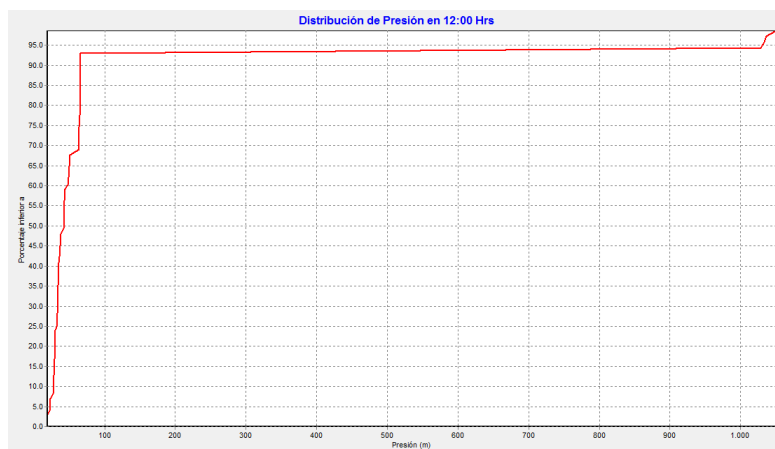


Fig. A-17 Evolución de la presión a la hora 12

Se observa en esta figura que la presión en la hora 12, el 45 % de nodos demandantes poseen una presión inferior a 25 m, el 70 % de nodos tienen una presión por debajo de los 50 m, el 83 % de nodos trabajan con presiones inferiores de 60 m. Por tanto la red está funcionando en forma óptima según el requerimiento necesitado.

Para observar de forma clara los niveles de presión en la red a las horas 4, 8 y 12 se muestra en las figuras el mapa de contorno de presiones.

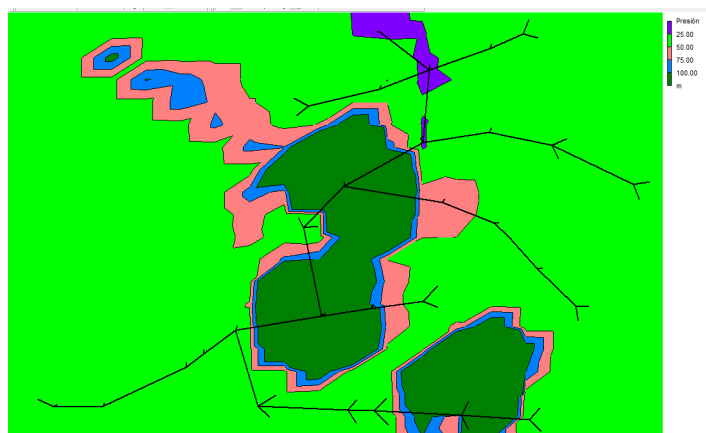


Fig. A-18 Mapa de contorno de presiones a la hora 4

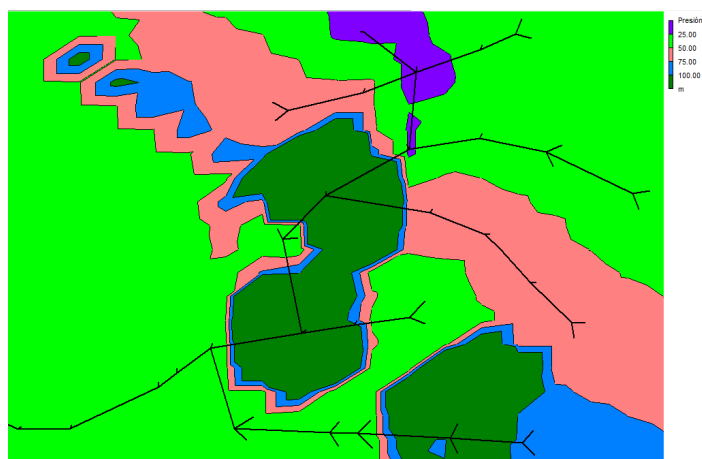


Fig. A-19 Mapa de contorno de presiones a la hora 8

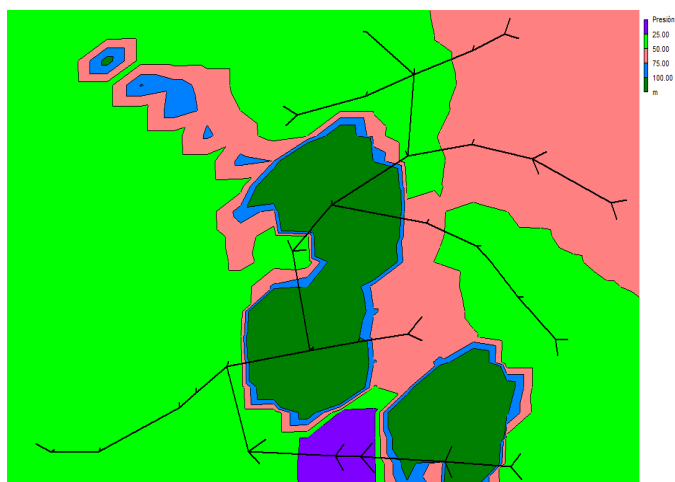


Fig. A-20 Mapa de contorno de presiones a la hora 12

COSTOS:

Cuando aplicamos el modelo PNLVAG a una red de riego, con la modalidad de riego por turnos obtenemos un coste total en tuberías que se encuentra valorado en:

**Coste Total de
la Solución = 9.033,84 USD**

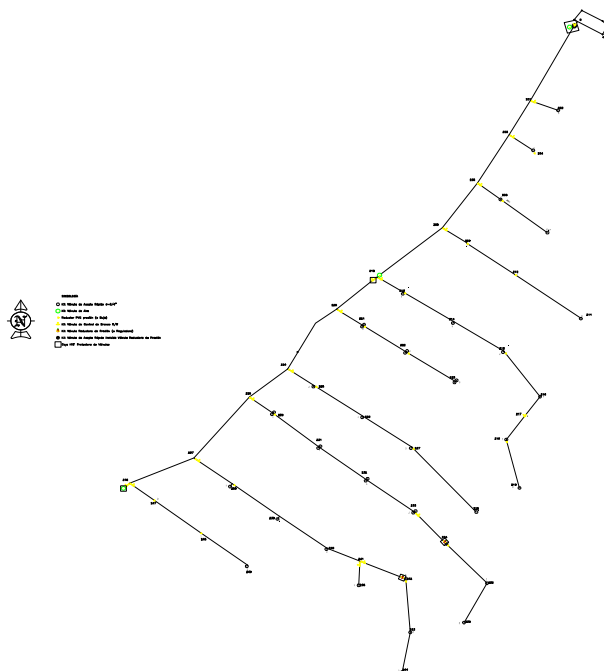
Luego cuando usamos el software Diopram y diseñando la red con la modalidad de riego a la demanda obtengo un costo total que asciende a:

**Coste Total de
la Solución = 21.384,76 USD**

ANEXO B: SISTEMA DE RIEGO CARIYACU

UBICACIÓN:

La comunidad de Cariyacu pertenece a la parroquia La Matriz del cantón Patate provincia de Tungurahua se halla ubicada en las coordenadas N 981137 E17 781137 (UTM WGS84 zona179, a una altitud promedio de 2400 msnm



La red está conformada por 67 hidrantes y 49 líneas, se ha considerado 2 turnos de 4 horas cada uno.

ÁREA DEL PROYECTO:

El área del proyecto está alrededor de 27,29 ha

LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO:

Los datos del levantamiento topográfico fueron proporcionados por el Gobierno Provincial de Tungurahua.

Se realizará la modelación dinámica de la red para observar el comportamiento de las variables a lo largo del tiempo.

Análisis de la red Cariyacu luego de aplicar la metodología PNLAYAG

Con la implementación del modelo PNLAYAG, la combinación de hidrantes resultante es:

NH	Nudo	Hidrante	TURNO	Ah (ha)	Qh (l/s)
1	202	1	2	0'3960	0'44349
2	204	4	1	0'4318	0'48362
3	204	4	2	0'4318	0'48362
4	206	6	1	0'3284	0'36775
5	206	6	1	0'3284	0'36775
6	207	7	1	0'1821	0'20390
7	207	7	1	0'1821	0'20390
8	209	9	2	0'4125	0'46200
9	209	9	1	0'4125	0'46200
10	210	10	2	0'3520	0'39418
11	210	10	2	0'3520	0'39418
12	211	11	1	0'2225	0'24920
13	211	11	1	0'2225	0'24920
14	213	13	2	0'3485	0'39026
15	213	13	1	0'3485	0'39026
16	214	14	1	0'3657	0'40953
17	214	14	2	0'3657	0'40953
18	215	15	2	0'3577	0'40057
19	215	15	1	0'3577	0'40057
20	216	16	2	0'5257	0'5888
21	217	17	2	0'6540	0'73250
22	218	18	2	0'7034	0'78781
23	219	19	1	0'6053	0'67791
24	219	19	1	0'6053	0'67791
25	221	21	1	0'2543	0'28476
26	221	21	2	0'2543	0'28476
27	222	22	1	0'2717	0'30430
28	222	22	1	0'2717	0'30430
29	223	23	1	0'4090	0'45802
30	223	23	2	0'4090	0'45802
31	225	25	1	0'4916	0'55059
32	225	25	1	0'4916	0'55059
33	226	26	1	0'4355	0'48776
34	226	26	2	0'4355	0'48776
35	227	27	1	0'5673	0'63532
36	227	27	2	0'5673	0'63532
37	228	28	2	0'4584	0'51341
38	228	28	2	0'4584	0'51341
39	230	30	1	0'2668	0'29882
40	230	30	2	0'2668	0'29882
41	231	31	1	0'2558	0'28650
42	231	31	2	0'2558	0'28650
43	232	32	2	0'2770	0'31018
44	232	32	2	0'2770	0'31018
45	233	33	1	0'2193	0'24562
46	233	33	1	0'2193	0'24562

47	235	35	2	0'4582	0'51314
48	236	36	1	0'6140	0'68768
49	236	36	1	0'6140	0'68768
50	238	38	2	0'6671	0'74710
51	238	38	2	0'6671	0'74710
52	239	39	2	0'4489	0'50277
53	239	39	2	0'4489	0'50277
54	240	40	1	0'3911	0'43798
55	240	40	1	0'3911	0'43798
56	242	42	1	0'5982	0'67004
57	243	43	2	0'7132	0'79877
58	244	44	2	0'3236	0'36238
59	244	44	2	0'3236	0'36238
60	245	45	1	0'5051	0'56571
61	245	45	1	0'5051	0'56571
62	247	47	2	0'4358	0'48804
63	247	47	1	0'4358	0'48804
64	248	48	2	0'3498	0'39178
65	248	48	1	0'3498	0'39178
66	249	49	2	0'3733	0'41810
67	249	49	1	0'3733	0'41810

Analizaremos seguidamente las variables hidráulicas:

✓ Caudales

Como se muestra en la figura B-1, los caudales que trasiegan las tuberías que resultaron de la implementación del modelo PNLAYAG. Y miramos que en el tramo inicial es aquel que va a conducir mayor cantidad de flujo, así como también aquellos tramos en donde existe mayor área de riego.

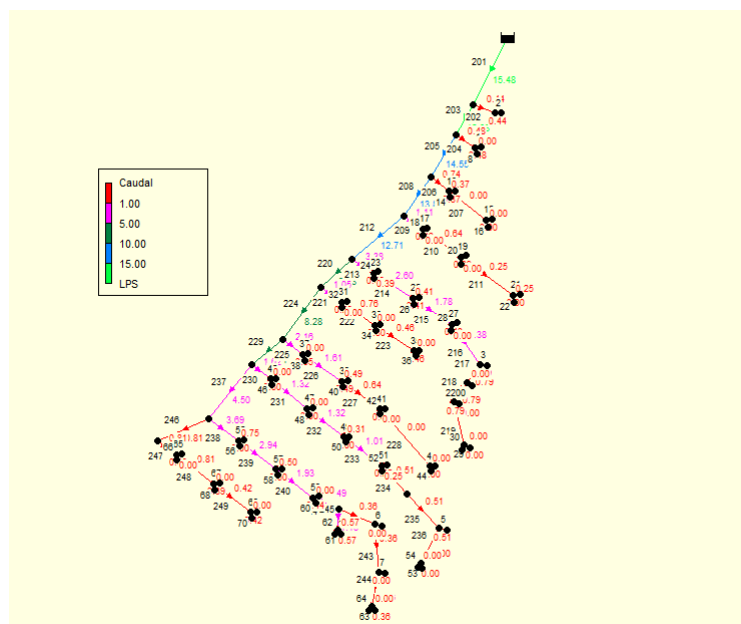


Fig. B-1. Distribución de caudales a la hora 2

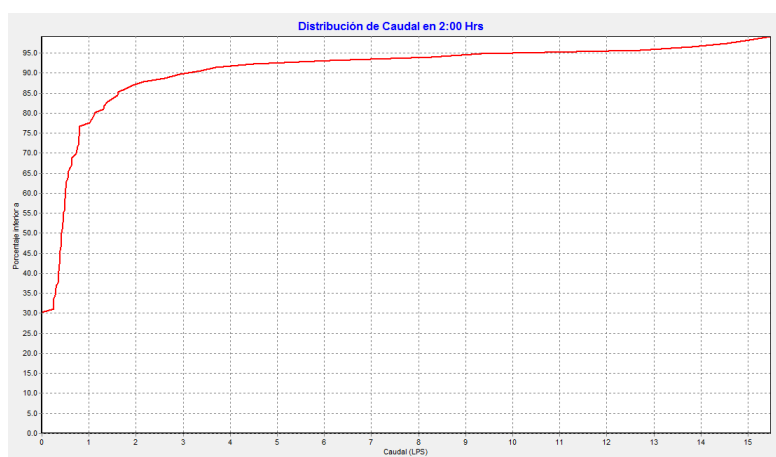


Fig. B-2. Distribución de caudales a la hora 2

Se observa que el 80 % de tuberías trasiegan un caudal inferior de 1 l/s, 10 % de tuberías un caudal inferior de 2 l/s y 5 % de tuberías un caudal inferior a 10 l/s

El balance de caudales que se obtiene cuando implementamos esta metodología en esta red funcionando en la modalidad de turnos (en este caso 2 turnos), se observa:

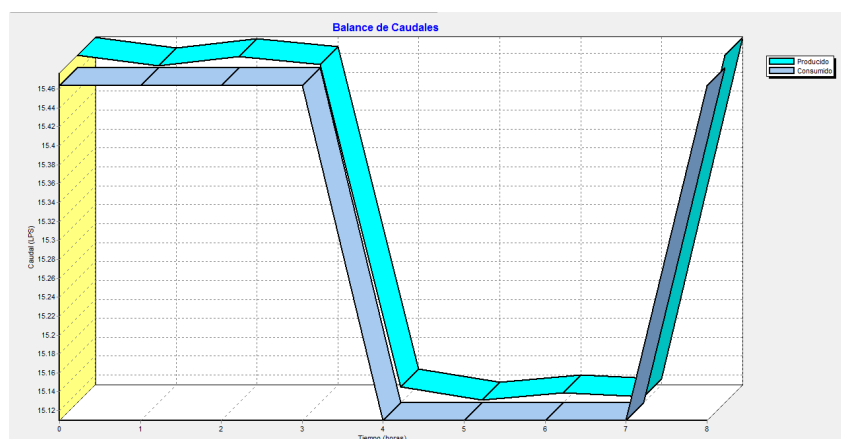


Fig. B-3 Balance de caudales en la red.

✓ **Velocidad.**

Luego de simular el modelo de la red de riego para 2 turnos, se observa que los valores de velocidad se encuentran dentro de los siguientes rangos que se observan:

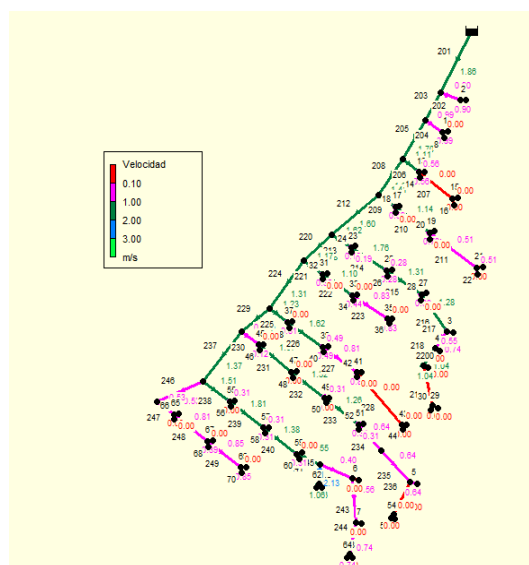


Fig. B-4 Distribución de velocidad a la hora 2.

Se presenta en el gráfico siguiente la curva de distribución de velocidades:

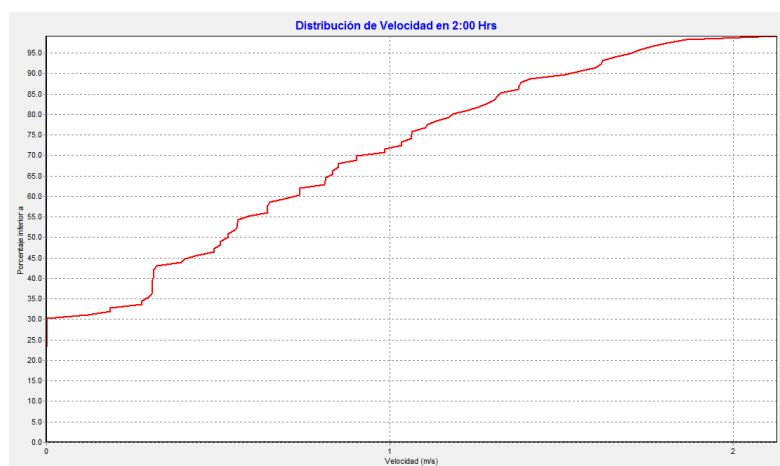


Fig. B-5 Distribución de velocidad a la hora 2

En esta curva de distribución de velocidades vemos que el 98 % de las tuberías presentan velocidades inferiores a 2 m/s lo que permitirá un correcto funcionamiento de la red, además con un rango de pérdidas aceptable.

✓ **Pérdidas de carga y alturas piezométricas**

Es importante evaluar el valor de pérdidas de carga que se producirán en la red, para tomar las precauciones necesarias. En la figura se puede observar los valores de pérdida de carga que se producen en la red a la hora 2.

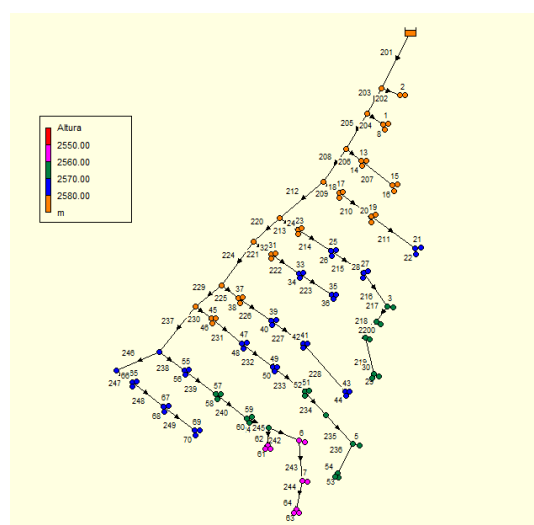


Fig. B-6 Distribución de altura piezométrica a hora 2

Luego, cuando observamos la curva de distribución de pérdidas en la hora 2, tenemos:

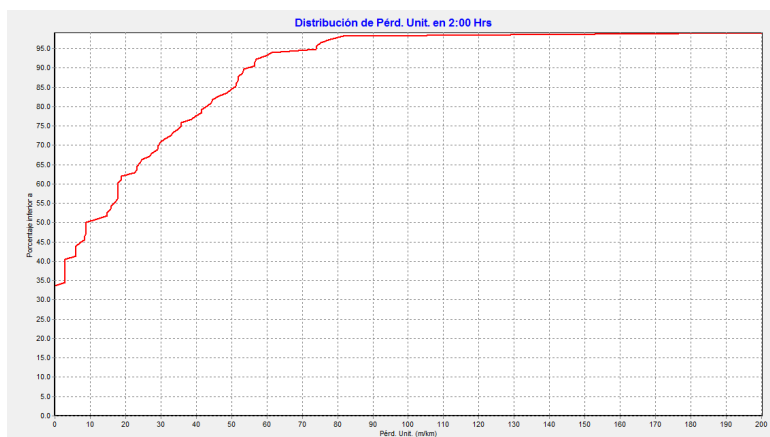


Fig. B-7 Pérdida de carga a la hora 2

Al observar esta figura podemos concluir que el 95 % de las tuberías tienen pérdidas menores a 70 m/km.

✓ Presiones

Analizando la presión que es una variable fundamental en el buen funcionamiento de la red, se muestra a continuación en la figura siguiente los horizontes de presión de los nudos demandantes en la red.

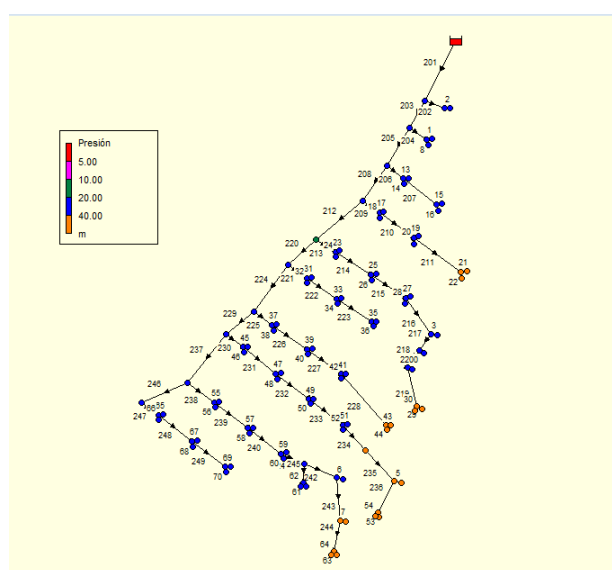


Fig. B-8 Presión en los nudos de la red a la hora 2

La distribución de presiones que miramos a continuación permite evaluar este parámetro en los nudos demandantes de la red en estudio.

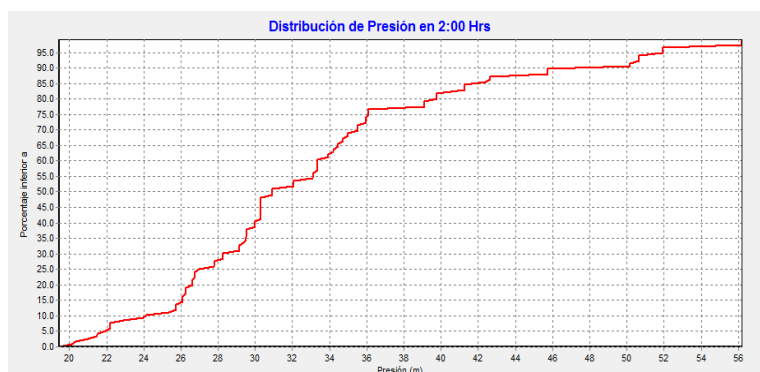


Fig. B-9 Presiones en los nudos de la red a la hora 2

Donde vemos que el 40 % de nudos demandantes de la red se encuentran por debajo de los 30 m de presión.

Para observar de forma clara los niveles de presión en la red a las horas 2, y 8 contamos con los mapas de contorno de presiones.

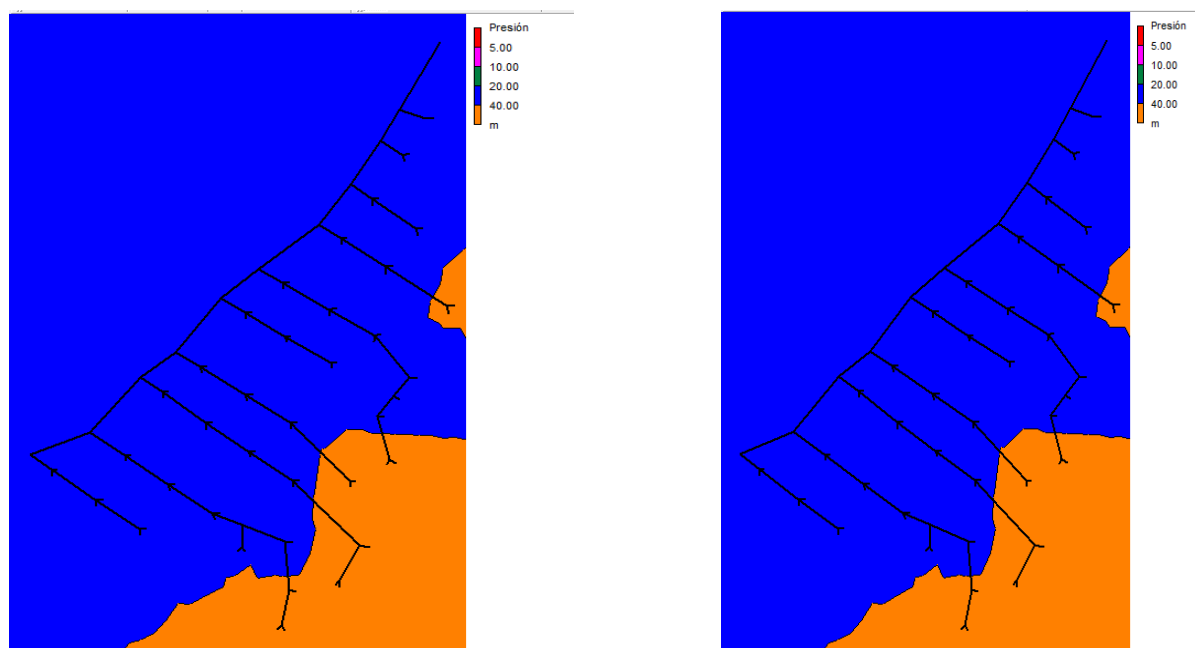


Fig. B-10 Presiones en los nudos de la red a la hora 2 y 4

Se observa que los nudos de demanda se encuentran trabajando en el rango de 20 a 40 m de presión, garantizando el buen desempeño de la red.

COSTOS:

Cuando aplicamos el modelo PNLVAG a una red de riego, con la modalidad de riego por turnos obtenemos un coste total en tuberías que se encuentra valorado en:

<p>Coste Total de la Solución = 10.130,02 USD</p>
--

ANEXO C: CALCULO DE COEFICIENTES

Luego de realizar una serie de pruebas de campo se detalla los valores de coeficientes de emisores obtenidos de la aplicación de la ecuación:

$$Q \left(\frac{l}{s} \right) = k(P(mca))^{0,5} \rightarrow \frac{Q}{p^{0,5}} = \left(k \text{ en } \frac{l}{mca^{0,5}} \right)$$

1. GOTEROS

El coeficiente de emisor para los goteros DRIPNET PC 12250 instalados, resultante de la relación caudal teórico con presiones de fábrica y de campo obtenidos son:

q teórico fábrica lit/seg	0,000444444	K
presión en mca fábrica (0,4 bar)	4,079997524	0,00022003
presión en mca fábrica (2,5 bar)	25,49998452	0,00008801
presión en mca campo	22,23074362	0,00009426

Con datos de caudal y presión receptados en la parcela tenemos:

Q (/s)	P(mca)	K obtenido
0,00045	22,23074	0,0000959

El valor del coeficiente K para la modelación en EPANET, será el que resulte de multiplicar el Kobtenido por 9, ya que se modela los 21 puntos de demanda en donde se encuentran dispuestos los goteros y no la salida por cada emisor, resultando un valor de:

Q (/s)	P(mca)	K obtenido
0,00407	22,23074	0,0008630

2. MICROASPERORES

En el caso de los emisores modelo 250 MICROASPERSON GYRONET LR usados, el resultado del coeficiente de emisor para la primera, segunda y tercera opción de funcionamiento con presiones y caudales teóricos es:

FABRICA				
		1ra opc. Func	2da opc. Func.	3ra. Opc.Func.
q teórico fábrica lit/seg		0,068611111	0,079166667	0,088611111
presión en psi fábrica		21,755655	29,00754	36,259425
presión en mca fábrica		15,29999071	20,39998762	25,49998452
K		0,017540779	0,0175278	0,01754762

Con caudal teórico y presión de trabajo medida en la parcela resulta:

CAMPO				
		1ra opc. Func	2da opc. Func.	3ra. Opc.Func.
q teórico fábrica lit/seg		0,068611111	0,079166667	0,088611111
presión en mca campo		39,76714118	39,76714118	39,76714118
K		0,010880084	0,012553944	0,014051607

Finalmente con variables de caudal y presión de trabajo leído en el SAD (sistema de adquisición de datos), se obtiene el coeficiente K que se modelará en la red en EPANET:

Q (l/s)	P(mca)	K obtenido
0,009107038	39,76714118	0,001444159

3. ASPERSORES

Para los ASPERSORES NAAN 5022 el coeficiente K obtenido considerando valores de caudal y presión teórica:

FABRICA				
q teórico fabrica lit/seg		0,039444444	0,486111111	0,056111111
presión en psi fábrica		29,00754	43,51131	58,01508
presión en mca fábrica		20,39998762	30,59998143	40,79997524
K		0,008733149	0,087876948	0,008784538

Al tomar en cuenta valores de caudal teórico y presión medida en campo, resulta:

CAMPO			
q teórico fabrica lit/seg	0,394444444	0,486111111	0,561111111
presión en psi fábrica	29,00754	43,51131	58,01508
presión en mca campo	19,97961597	19,97961597	19,97961597
K	0,088245441	0,10875318	0,125532246

Con valores de caudal y presión medidos en la parcela, que han sido considerados para la modelación en EPANET, se obtiene:

Q (/s)	P(mca)	K obtenido
0,086000255	19,97961597	0,019240

Las presiones de trabajo que se obtienen con la red asignando los 3 turnos y coeficientes de emisor, resulta:

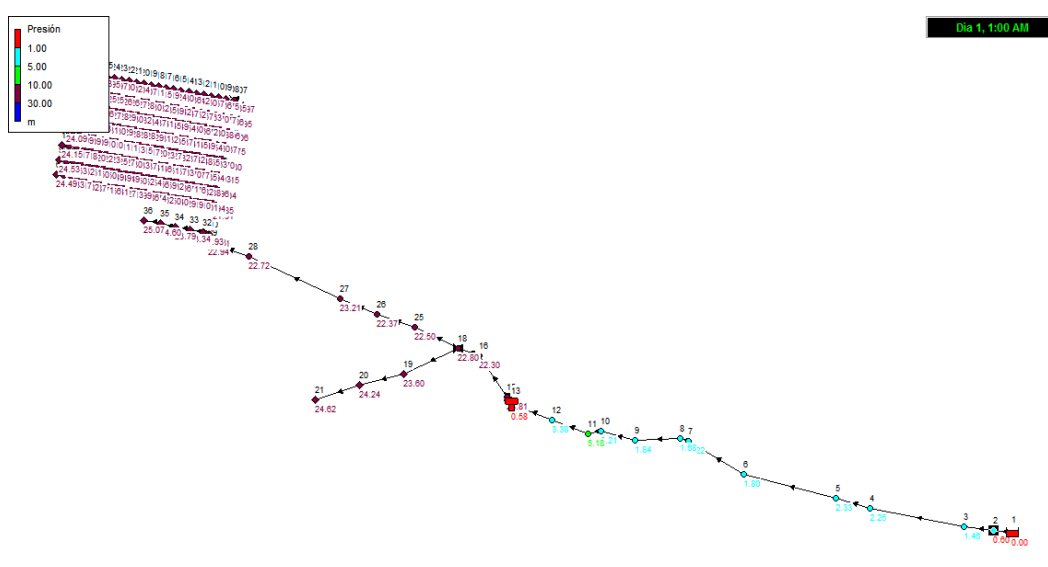


Fig. C-1. Presión en los nudos de la red monitoreada en la hora 2

Realizando la modelación de la red de la parcela demostrativa y con los coeficientes de emisor adoptados, obtengo el siguiente mapa de contorno de presiones:

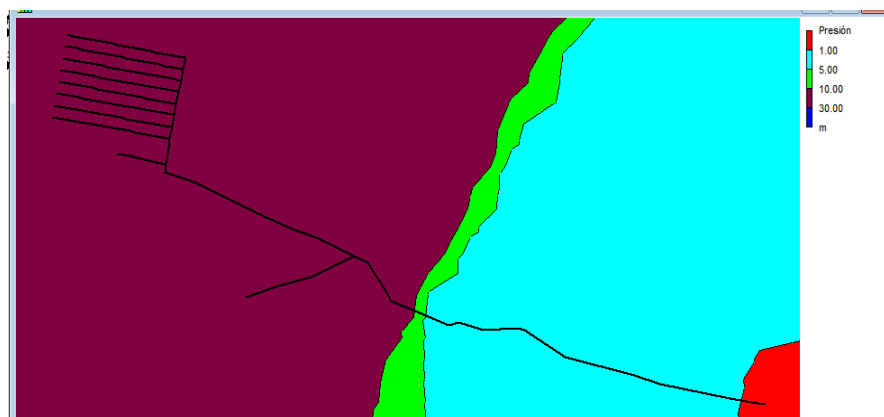


Fig. C-2. Mapa de contorno de presiones en la parcela demostrativa
 En donde se aprecia que las presiones de trabajo más significativas entre 10 y 30 mca están localizadas justamente en el área en donde se encuentran instalados los emisores empleados.

COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE FABRICACIÓN (CV)

El coeficiente de variación de fabricación para cada uno de los emisores usados en la parcela demostrativa, son:

✓

ASPERSORES

S	0,013180
q _m	0,086000
CV	0,153255
Categoría	C

✓

MICROASPERSORES

S	0,007170
q _m	0,009475
CV	0,756719
Categoría	C

✓

GOTEROS

S	0,000001
q _m	0,000452
CV	0,001382
Categoría	A

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD DE CAUDALES

Con el equipo implementado en la parcela de monitoreo se ha realizado una serie de pruebas en campo para determinar el coeficiente de uniformidad, se muestra en el cuadro 27 los datos y resultados representativos obtenidos:

Cuadro 27. Cálculo coeficiente de uniformidad de caudales

Volumen	60	ml						
Planta No	LINEA A		LINEA C		LINEA D		LINEA E	
	t (s)	Q (l/s)	t (s)	Q (l/s)	t (s)	Q (l/s)	t (s)	Q (l/s)
1	133'91	0'00045	130'41	0'00046	121'23	0'00049	136'22	0'00044
2								
3								
4								
5								
6								
7	123'14	0'00049	132'15	0'00045	136'03	0'00044	138'53	0'00043
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15	132'48	0'00045	129'03	0'00047	138'42	0'00043	135'36	0'00044
16								
17								
18								
19								
20								
21	140'99	0'00043	134'13	0'00045	141'53000	0'00042	139'15000	0'00043
SUMATORIA		0'00181		0'00183		0'00179		0'00175
MINIMOS		0'00043		0'00045		0'00042		0'00043
Q PROM'		0'00045		0'00046		0'00045		0'00044
Q PROM' T		0'00045						
PRESIÓN FINAL	Psi	21		22		22		22
	bares	1'6		1'6		1'7		1'6

Resultando el coeficiente de uniformidad de caudales igual a:

q 25%	0'000432
qm	0'000449
Cuc %	96'25

Por lo cual resulta que el coeficiente de uniformidad está dentro del rango EXCELENTE.

EVOLUCION DE VARIABLES HIDRAULICAS EN PARCELA

Cuando realizamos el monitoreo de la parcela demostrativa a través del sistema de adquisición de datos obtenemos las siguientes gráficas de la evolución de caudal y presión en los diferentes emisores que se ha instalado.

➤ En aspersores

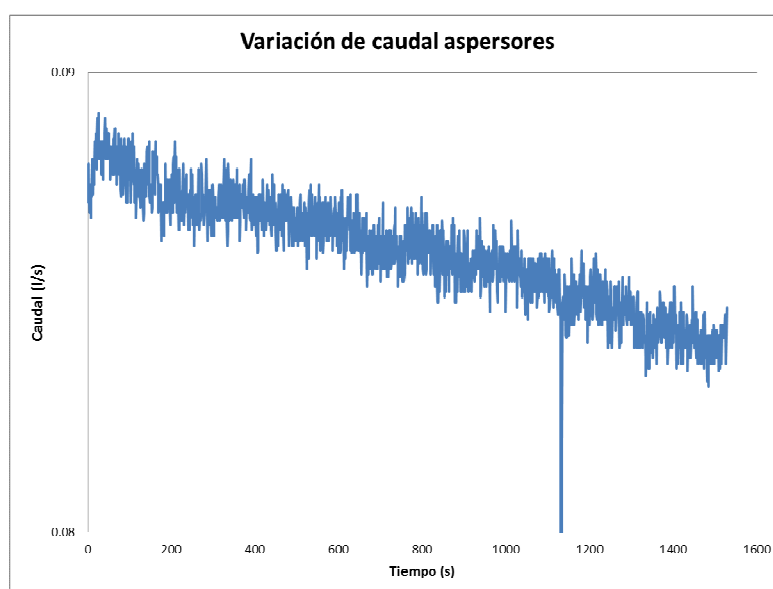


Fig. C-3. Evolución de caudal en el tiempo en aspersores

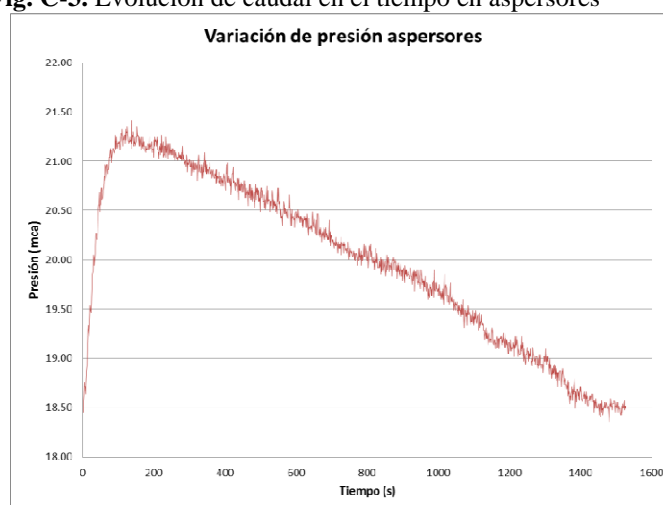


Fig. C-4. Evolución de la presión en el tiempo en los aspersores.

Se observa que la evolución del caudal en los aspersores se encuentra fluctuando entre 0'09 y 0'08 l/s, esta disminución se produce por la mala calidad de agua usada que tapona los filtros que tiene la instalación para su correcto funcionamiento.

En forma similar observamos la discontinuidad de la presión en el rango de 18'50 a 21'30 mca

➤ En microaspersores

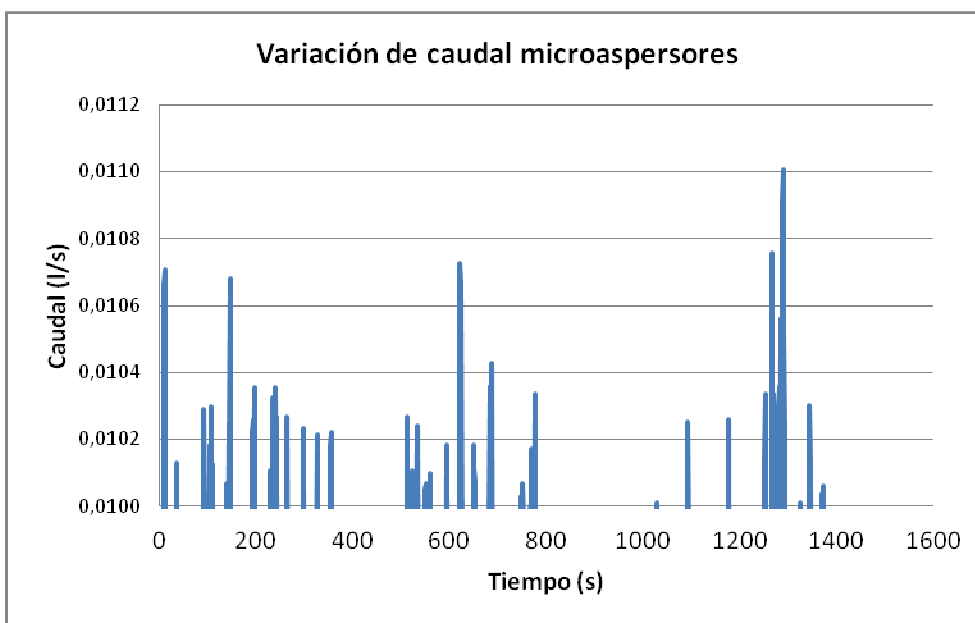


Fig. C-5. Desarrollo del caudal en el tiempo en microaspersores.

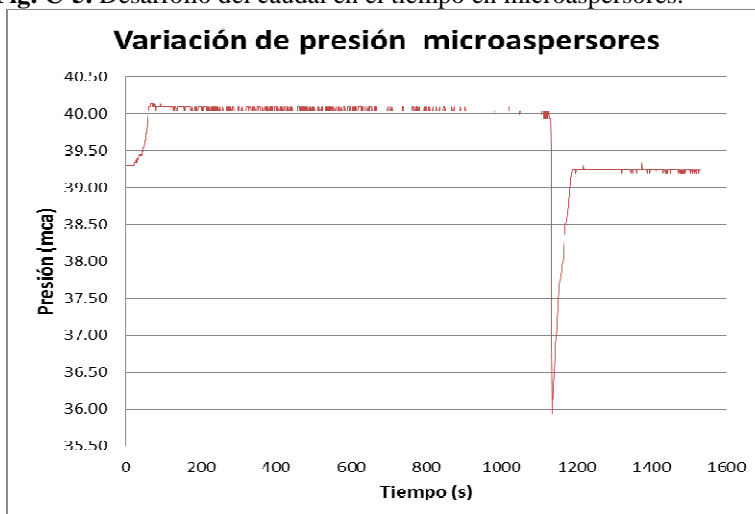


Fig. C-6. Evolución de la presión en el tiempo en microaspersores.

Se observa que la evolución del caudal en los microaspersores se encuentra fluctuando entre 0'010 y 0'0112 l/s, En cuanto a la presión se observa dos niveles de variación. En forma similar observamos la discontinuidad de la presión en el rango de 36 a 39 mca.

➤ Goteros

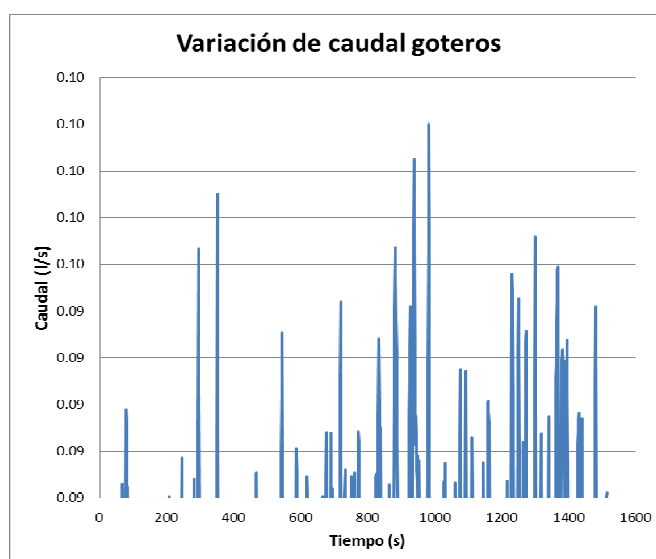


Fig. C-7. Evolución del caudal en el tiempo en goteros.

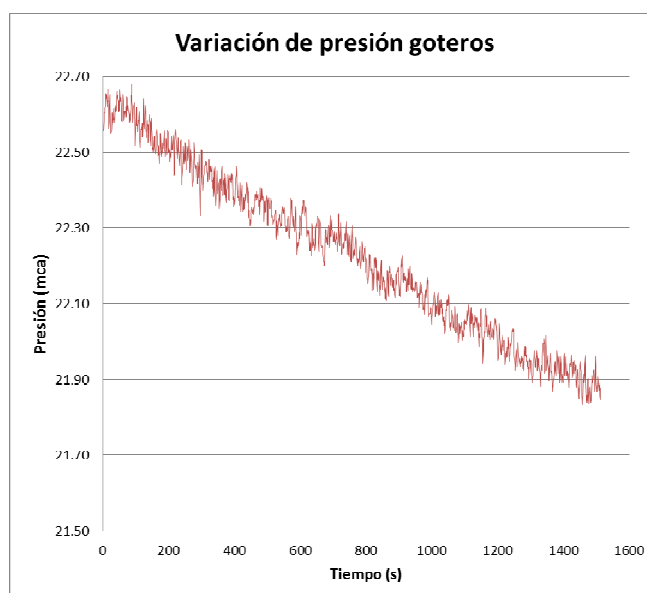


Fig. C-8. Fluctuación de la presión en el tiempo en los goteros.

Se observa que la evolución del caudal en los goteros se encuentra fluctuando entre 0'9 y 0'10 l/s. En forma similar observamos la variación de la presión entre 21'90 a 22'70 mca.

**ANEXO D: MANUAL BÁSICO DE USO DE DATALOGGER
HOBOWARE**

MANUAL BÁSICO DE USO DE DATALOGGER HOBOWare

El software HOBOWare es usado para configurar, registrar y descargar datos de un Datalogger fabricado por la compañía ONSET Datalogger. Los HOBOWare datalogger son dispositivos multicanales, registradores de datos que tienen una resolución de 9 – 12 bits para la lectura de sensores además de tener interfaz seriales o USB para la comunicación con el ordenador.

A continuación se presentan instrucciones detalladas para la puesta en marcha y la descarga de datos desde el HOBOWare U2 que es un registrador de 4 canales los mismos que:

- Disponen de capacidad de almacenamiento de 43000 mediciones, con una resolución de 12 bits.
- En tamaño es comparado con una cajita de fósforos grande por lo que es muy ligero
- Cuenta con una memoria no volátil que conserva los datos incluso cuando haya falla de batería.

Proceso de iniciación.



- Antes de Abrir el Software HOBOWare comprobar que el reloj del ordenador donde se lo va a conectar al equipo sea la correcta, el Hobo sincroniza su reloj interno con el del sistema cuando se inicia.
- Además de abrir el HOBOWare verificar que todos los sensores estén correctamente conectados al mismo para que no exista mala interpretación de datos ni alteración de éstos.
- Conectar el HOBOWare U12 al ordenador mediante la interfaz usb
- Abrir el software de HOBOWare dando click en el icono 
- Luego se abrirá una interfaz similar a la que se muestra en la Figura:



Figura D-1.- Interfaz de Inicio de HOBOWare

- Una vez abierta esta interfaz damos clic en el icono 
- Se mostrará entonces un mensaje como el que se observa:

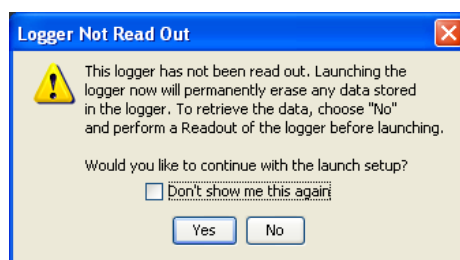


Figura D-2. Mensaje de advertencia al iniciar configuración.

- Presionamos el botón de SI o NO dependiendo si se quiere eliminar la memoria del datalogger luego de ser leídas por el software o si se los deja en el equipo.
- A continuación se mostrará la ventana de configuración de lectura del datalogger.

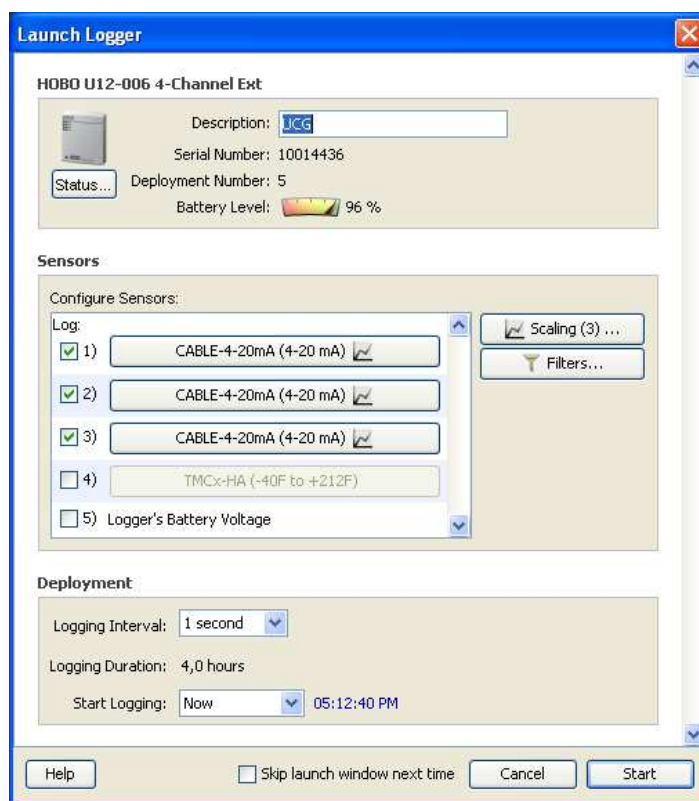


Figura D-3. Ventana de configuración.

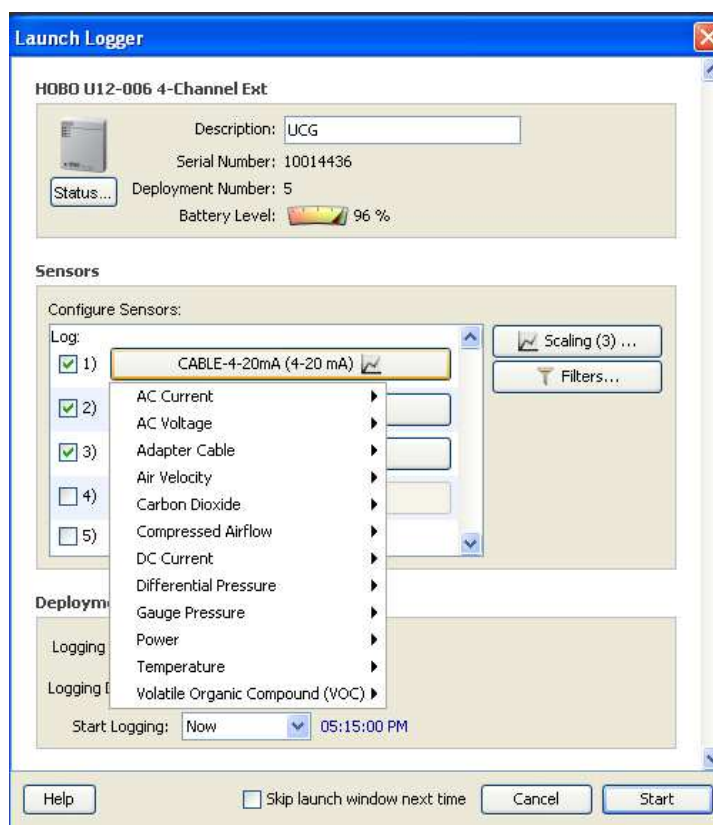


Figura D-4. Ventana de configuración.

En donde seleccionamos el tipo de entrada del datalogger en nuestro caso se selecciona “DC Current”, que es el tipo de señal que envía los cuatro sensores a utilizar (véase Figura D-4.).

- Seleccionados los canales a monitorear y el tipo de entrada, Figura D-3. y Figura D-4. , damos clic en el botón SCALING en de donde se muestra el siguiente cuadro:

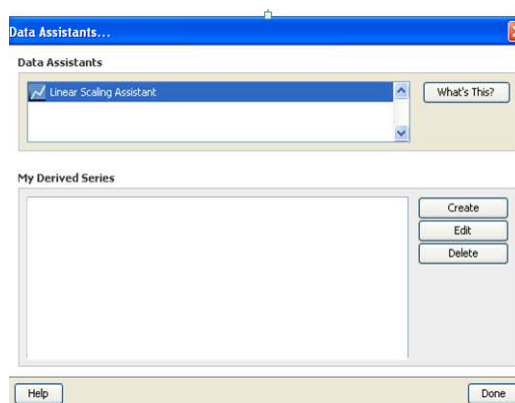


Figura D-5. Cuadro de configuración de escalas.

- Una vez en el cuadro de escalas se debe crear cada una de las escalas de los sensores conector en cada uno de los canales del datalogger, para lo cual damos clic en el botón de “CREAR” en donde nos aparecerá una ventana como ésta:

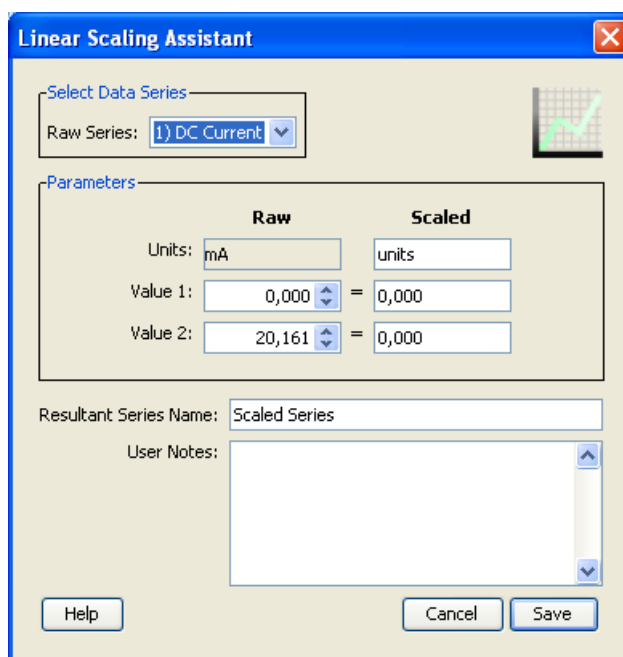


Figura D-6. Configuración de escalas en cada canal

En la Figura D-7. Se muestra tres cuadros de configuración:

En el cuadro de Select Data Series, se selecciona el canal con el tipo de entrada a la cual se le va aplicar la escala, Figura D-7, se ha seleccionado en este caso el canal 1 que tiene una entrada de corriente en DC (DC Current),

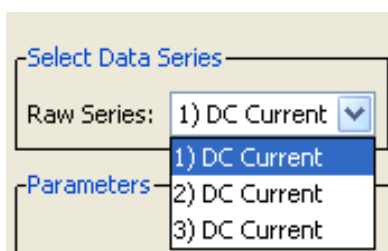


Figura D-7. Selección del Canal y tipo de entrada del mismo.

- En el panel de Parámetros se edita el rango y la escala, se reemplaza UNITS por las unidades de medida que se está midiendo ejemplo: l/m, psi, etc.
- En los cuadro de edición de Value 1 se ubica el valor de medida más bajo en este caso como es de corriente el valor será de 4 mA, para el caso de los sensores usados, y 20 mA el máximo de corriente.

Cuadro 1: Valores de configuración de escalas para HOBOWare.

Canal	Sensor	Value 1 (ValMin)	Equivalencia Min	Value 2 (ValMax)	Equivalencia Min	Unidades
1	Caudal	4mA	0 L/m	20mA	200L/m	L/m
2	Precision1	4mA	0PSI	20mA	100PSI	PSI
3	Precision2	7.9mA	0PSI	20mA	79.51PSI	PSI

- Una vez configurados todos los canales con sus respectivas escalas damos clic en SAVE y tendremos una ventana así:

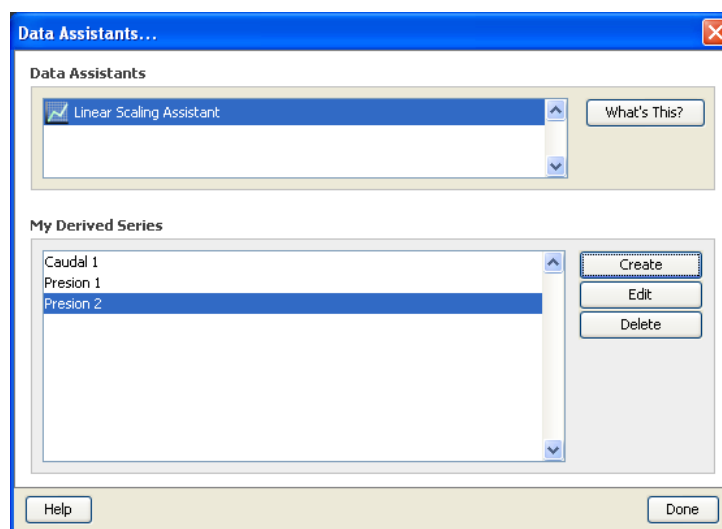


Figura D-8. Luego del configuración de las escalas

- Una vez configuradas las escalas presionamos clic en DONE y vamos a configurar el tiempo en que recogerá cada muestra y el tiempo de inicio en la parte inferior de la ventana. En nuestro caso será cada segundo e inicia la recolección de datos en el preciso instante, luego de esto le damos clic en start para iniciar la recolección de datos.
- Para visualizar el estado actual del dispositivo damos clic en el botón Status Device



- De donde aparecerá una pantalla que muestra el estado actual de los sensores la medida en ese preciso instante, Figura D-9.

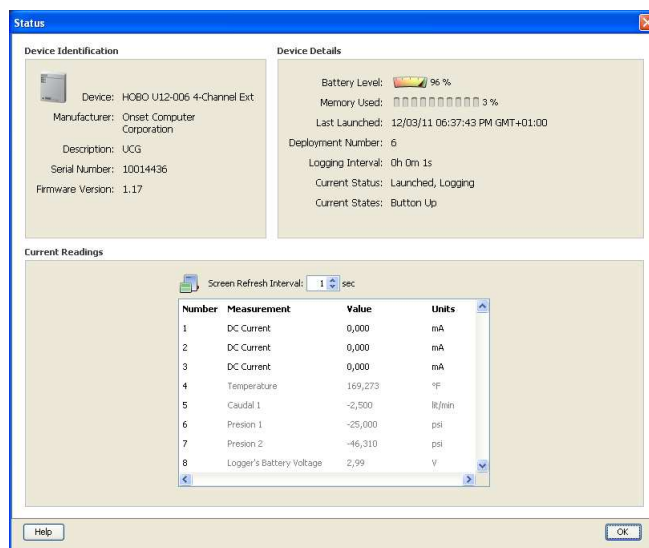



Figura D-9. Estados actuales de los sensores conectados al HOBO

- Una vez receptados los datos, podemos visualizar la variación de los sensores en gráficas según los datos adquiridos para esto damos clic en el botón 

Donde se muestra un mensaje en el cual advierte que el datalogger está ejecutándose en ese momento si desea parar la ejecución, dependerá del usuario. En este caso se solicitará la dirección de guardado del archivo con todos los datos adquiridos hasta el momento.

- Luego se mostrará una ventana donde nos preguntará los parámetros a graficar según nuestros requerimientos.

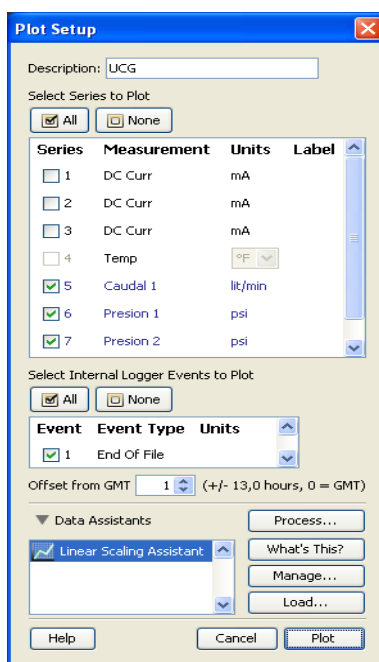


Figura D-10. Plot Setup

Una vez seleccionados los parámetros a graficar obtenemos las gráficas resultantes, En donde se puede visualizar todos los parámetros importantes de la adquisición realizada.

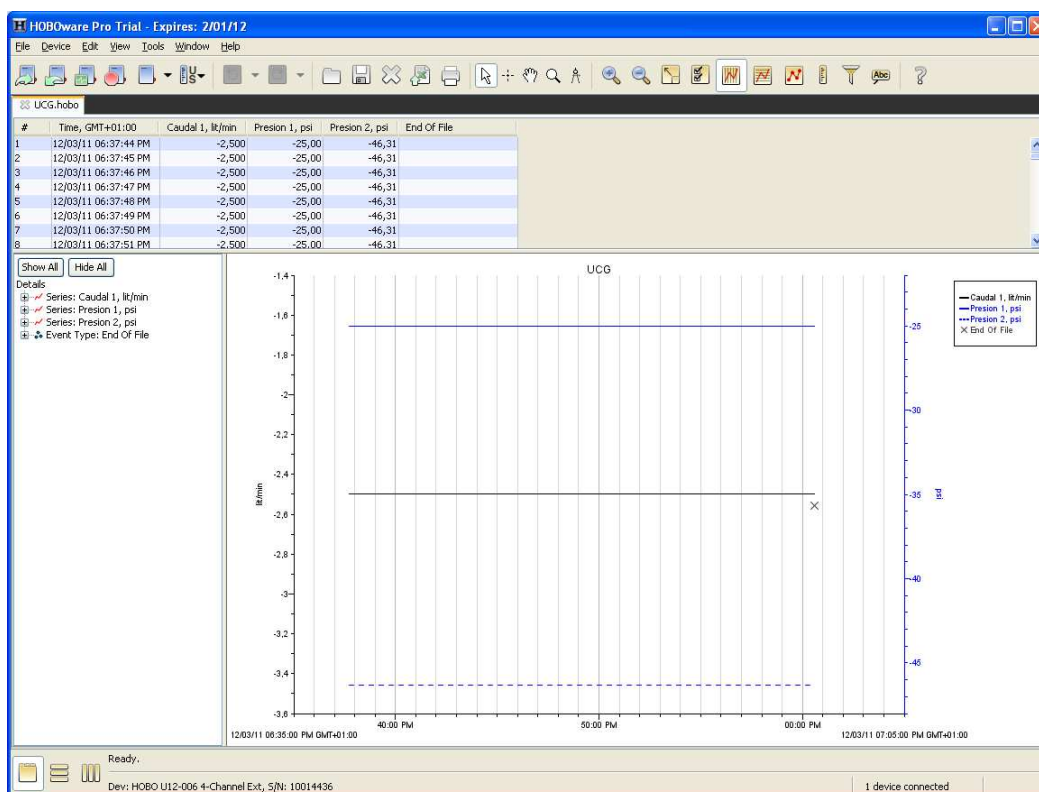


Figura D-11. Gráficas a mostrar

