

Design and Optimization of a Network of Drip Irrigation Pipes in the Town of Protachuelos, Ica.

Juan Segundo Rojas Gutiérrez¹, Alexia Cáceres Cansaya¹, Jonatán Edward Rojas Polo, Mg.¹, Jorge Luis Castro Pariona¹, y Alejandro Alonso Maguiña Rodríguez¹

¹Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, jsrojas@pucp.edu.pe, alexia.caceres@pucp.pe, jrojas@pucp.pe, jorge.castrop@pucp.pe, alejandro.maguina@pucp.pe

Abstract– This research seeks to optimize the usage of the available water resources in the town of Portachuelos, Ica. Ica has several drought seasons which hinders and in some cases makes impossible the irrigation of several crop fields, causing a negative impact in the economy of the local families who counts on agriculture for a living. On top of that, the usual irrigation system in the town wastes too much water that could be put to good use during the drought seasons. We plan to design a drip irrigation system that will optimize the consumption of water per crop field

Keywords: Drip irrigation, optimization, and irrigation system design

Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2016.1.1.347>

ISBN: 978-0-9822896-9-1

ISSN: 2414-6390

Diseño y optimización de una red de tuberías de riego por goteo en la localidad de Portachuelos, Ica.

Juan Segundo Rojas Gutiérrez¹, Alexia Cáceres Cansaya¹, Jonatán Edward Rojas Polo, Mg.¹, Jorge Luis Castro Pariona¹, y Alejandro Alonso Maguina Rodríguez¹

¹Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, jsrojas@pucp.edu.pe, alexia.caceres@pucp.pe, jrojas@pucp.pe, jorge.castrop@pucp.pe, alejandro.maguina@pucp.pe

Abstract– *This research seeks to optimize the usage of the available water resources in the town of Portachuelos, Ica. Ica has several drought seasons which hinders and in some cases makes impossible the irrigation of several crop fields, causing a negative impact in the economy of the local families who counts on agriculture for a living. On top of that, the usual irrigation system in the town wastes too much water that could be put to good use during the drought seasons. We plan to design a drip irrigation system that will optimize the consumption of water per crop field*

Keywords: *Drip irrigation, optimization, and irrigation system design*

Resumen – *La presente investigación tiene como objetivo optimizar el recurso de agua disponible en la localidad de Portachuelos, Ica. Existen temporadas largas de escasez de agua lo cual dificulta; y en muchos casos, imposibilita el riego de muchos cultivos impactando de forma negativa en la economía de las familias que se dedican a esta actividad. Adicionalmente, el sistema de riego que predomina en el lugar es ineficiente pues se desperdician cantidades excesivas del recurso evitando que se utilice en el riego de temporadas de lluvia baja. En ese sentido se planea diseñar el sistema de riego por goteo que, en gran medida, optimizará el consumo de agua por cultivo. Palabras clave: Riego por goteo, optimización, diseño de sistema de riego*

las zonas áridas por su uso óptimo de agua y abonos. El agua aplicada por este método de riego se infiltra hacia las raíces de las plantas irrigando directamente la zona de influencia de las raíces a través de un sistema de tuberías y emisores (goteros), que incrementan la producción. Se caracteriza por el uso de pequeños caudales a baja presión, la localización de las aguas en las plantas a través de diversos puntos de emisión y con una alta presión de aplicación puede tener un buen desempeño en lugares altos. En consecuencia, podemos automatizar por completo el sistema de riego, reducir la aparición de malas hierbas y se adapta a cualquier terreno sea este rocoso o con pendientes muy pronunciadas, entre otras ventajas. El riego por goteo aprovecha de manera adecuada el agua suministrada y se empleará la cantidad óptima de metros de tubería para llegar a todos los campos de cultivo [2]. El objetivo principal de riego es proporcionar plantas con agua suficiente para prevenir el estrés que puede reducir el rendimiento. La frecuencia y la cantidad de agua dependen de las condiciones climáticas locales, cultivo y etapa de crecimiento, y las características de humedad del suelo vegetal [3]. El problema de llegar a todos los campos de cultivo requiere una aplicación de árbol de expansión mínima para el cual hay dos posibles algoritmos de solución: algoritmo de Prim y algoritmo de Kruskal.

Para el presente problema, emplearemos el algoritmo de Prim para elaborar la red de tuberías.

I. INTRODUCCIÓN AL TEMA

La agricultura es una actividad económica primaria y tradicional en el Perú, desde las culturas pre-incas. El hombre andino con su ingenio supo superar las dificultades de su entorno; es así que en las frágiles quebradas se construyeron andenes, irrigados por un sistema de canales de agua, que le permitieron aumentar el área de tierra cultivable (Rostworowski, 2014).

El agua es un bien escaso. Sólo un 3% del agua que hay en el planeta es dulce. Sin embargo, la demanda del líquido elemento aumenta sin cesar y no sólo para cubrir nuestra necesidad básica de beber, sino otras como la de su uso para la agricultura y la industria [1]. La localidad de Portachuelos, en el departamento de Ica se encuentra en una zona desértica por lo que un adecuado aprovechamiento de la cantidad de agua disponible es vital para la agricultura. Basado en esto desarrollaremos una red de tuberías para riego por goteo. Escogimos el método de riego por goteo pues es adecuado para

Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2016.1.1.347>
ISBN: 978-0-9822896-9-3
ISSN: 2414-6390

II. ESTADO DEL ARTE

A. Modelo de redes

En la actualidad muchos problemas de la investigación de operaciones, tales como los problemas importantes de optimización se analizan mejor mediante la representación gráfica de su red, según encuestas recientes señalan que este tipo de problemas de redes abarcan hasta un 70% de los problemas de programación matemática en el mundo real. Dentro de este rango podemos ver problemas de la vida diaria tales como: redes de transportes, redes eléctricas y de comunicaciones, así mismo problemas en la gestión empresarial como: Producción, Asignación de tareas, planeamiento de proyectos (fechas de inicio y terminación de las actividades), administración en la restricción de recursos, distribución y abastecimiento logístico. También es usado En sector minero - red de gaseoductos, entre otros. Muchos de los problemas con modelos de redes son casos especiales de la programación lineal (Hillier y Lieberman [4], Taha [5], Winston [6]).

En la actualidad se han desarrollado diversas simbologías y terminologías para definir una red. Dentro de las cuales cabe mencionar la definición de Taha [5], donde señala que: “Una red consiste en una serie de nodos enlazados con arcos. La notación para describir la red es (N, A), donde N es el conjunto de nodos y A es el conjunto de arcos”. Observe la red de la Figura 1.

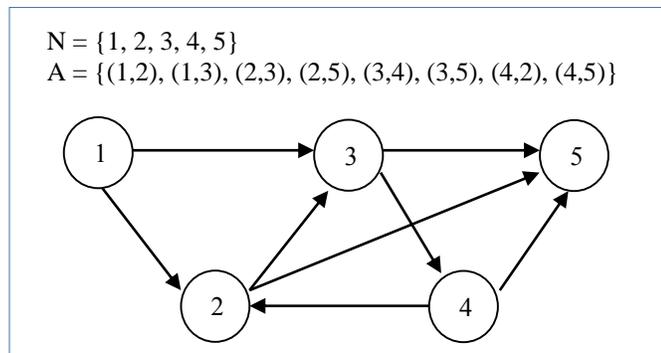


Fig.1 - Ejemplo de una red (N, A)
Fuente: Taha [5]

Árbol de expansión mínima

El problema del árbol de expansión mínima es un tipo de problema, tal como lo menciona Hillier y Lieberman [4], trabaja con una red no dirigida y conexa, en donde la información que posee cada arco es una medida positiva que puede ser: distancia, costo, tiempo, o cualquier otro parámetro. Siendo su principal función seleccionar un conjunto de arcos que satisfacen a la longitud total más corta entre todos los arcos de la red.

En resumen sigue tres principios:

- Se tienen todos los nodos de la red como permanentes.
- La red debe poseer los suficientes arcos para que exista un camino entre todos los nodos.
- Su objetivo es minimizar la longitud total de los arcos insertados en la red.

Cabe mencionar según Taha [5], que este método desarrolla a la red como un árbol, por lo tanto la solución de una red con N vértices deberá tener $N - 1$ arcos. Esta red enlaza los nodos de la red, en forma directa o indirecta, con la mínima longitud de ramas enlazantes. Se pueden desarrollar los problemas de conectividad o árbol de expansión mínima con el Algoritmo de Prim y el algoritmo de Kruskal.

Algoritmo de Prim

Este algoritmo fue propuesto por Prim (1957) [7], el cual consiste en dividir los nodos de una red en dos conjuntos: seleccionados y no seleccionados, donde el conjunto de nodos seleccionados irá aumentando en un nodo por el lado del arco más pequeño de cada iteración, además se debe evitar que esta agrupación forme un ciclo.

Los dos principios fundamentales para la construcción de redes de conexión más corta o expansión mínima, son:

- Principio 1 - Todos los terminales aislados se pueden conectar a un vecino más cercano.
- Principio 2 - Cualquier fragmento aislado se puede conectar a un vecino más cercano por un enlace más corto disponible.

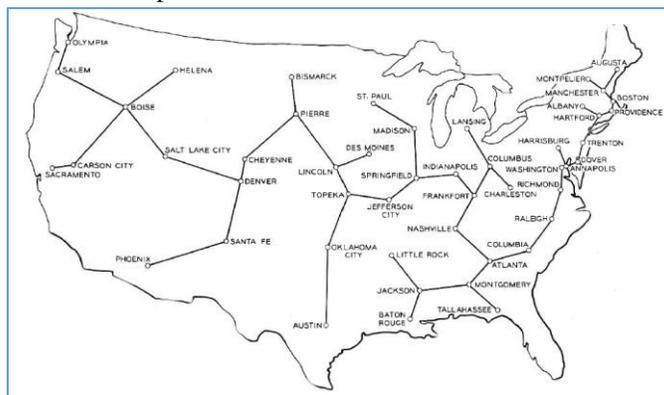


Fig.2 - Red de conexión más corta en EEUU.
Fuente: R. Prim [7]

El algoritmo de Prim es un algoritmo perteneciente a la teoría de los grafos para encontrar un árbol de expansión mínima en un grafo conexo, no dirigido y cuyas aristas están etiquetadas. R. Prim [7] comenta que es un problema básico que considera la interconexión de un conjunto dado de terminales con una red más corta posible de enlaces directos. Para lo cual realizan procedimientos sencillos y prácticos para la solución de este problema tanto de forma gráfica y computacionalmente. Además el desarrollo de procedimientos sirve de soluciones para una clase más amplia de problemas, que contiene otros ejemplos de interés práctico.

III. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Según información proporcionada por allegados a la localidad de portachuelos, se realizó un mapeo inicial de los tres sectores cuya fuente de agua es el Río Santa Cruz. Asimismo, contempla las áreas de cada sembrío, su perímetro, y las distribuciones de estas.

Para poder ilustrar el la distribución de riego, se realiza un grafo, el cual está representando como nodos a los puntos en los que se colocará las tuberías principales que abastecerán a las tuberías menores dentro de cada campo de cultivo; se espera que esta tubería principal se coloque en el centro del campo de cultivo a abastecer de ser posible, y los arcos estarán representados por la distancia entre dichas tuberías principales lo que viene a ser la distancia en metros entre un campo de cultivo y otro. Se seleccionó también uno de los nodos debido a su localización pues se ubica cerca al río Santa Cruz y será la ubicación de la fuente de agua para el resto de los campos ubicados en el área de aplicación. A continuación se presenta la figura del área de aplicación con los respectivos nodos y áreas delimitadas como se aprecia en la figura 3



Fig. 3. Croquis del área

Posteriormente, para se subdivide la red mostrada en la figura 3, realizando el grafo que se aprecia en la figura 4 para poder clusterizar por lote.

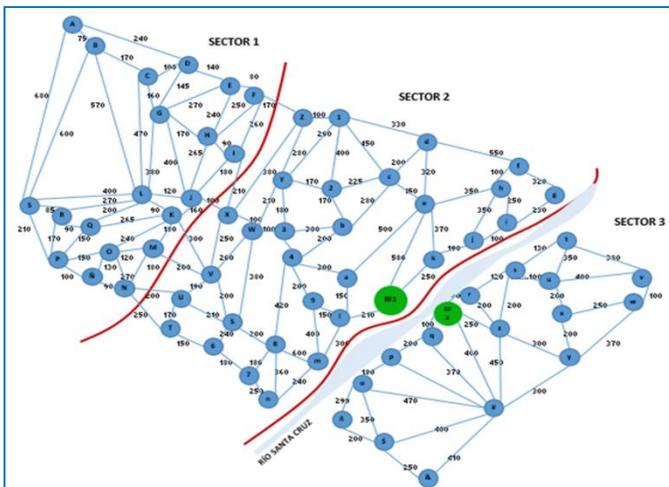


Fig. 4 Grafo del área

Así también, el terreno se dividió en dos sectores alimentados cada uno por fuentes principales de suministro de agua, llamados RF1 y RF2. Para realizar modelo matemático, se muestra inicialmente el pseudocódigo del algoritmo de Prim:

Algoritmo de Prim

```
Prim ( L [ 1..n , 1..n ] ) : 'conjunto de arcos
'Inicialización: sólo el nodo 1 se encuentra
en B
T=NULL 'T contendrá los arcos del árbol de
extensión mínima Distmin[1]=-1
```

```
para i=2 hasta n hacer
  más_próximo [ i ]=1
```

```
distmin [ i ]=L [ i , 1]
para i=1 hasta n -1 hacer
  min=infinito
  para j=2 hasta n hacer
    si 0 <= distmin [ j ] < min entonces
      min=distmin [ j ]
      k=j
      T=T union {mas_próximo [ k ], k }
      distmin [ k ]=-1 'se añade k a B

  para j=2 hasta n hacer
    si L[j ,k] < distmin [ j ] entonces
      distmin [ j ]=L [ j , k ]
      más_próximo [ j ]=k
devolver T
```

Posteriormente se detalla la modelación de programación lineal con el apoyo del lenguaje LINGO [8]. La corrida del modelo se realiza para cada sector:

RF1 :

MODEL:

MODELO:

! Dado el número de nodos y la distancia entre ellos, la búsqueda de la distancia total más corta de enlaces en la red para conectar todos los nodos. Es el problema clásico llamado árbol de expansión mínima (MST).

SETS:

```
CITY /1..51/:U;
LINK(CITY, CITY):
  RF1, X;
! U(I) = nivel de la ciudadI;
! U(1) = 0;
```

ENDSETS

DATA:

```
RF1 = MATRIZ 1
! Matriz de distancia no tiene por qué
ser simétrica;
```

ENDDATA

```
N = @SIZE(CITY);
! Minimizar la distancia total de los
enlaces;
MIN = @SUM(LINK: DIST * X);
@FOR(CITY(K) | K #GT# 1:
  @SUM(CITY(I) | I#NE#K: X(I, K)) = 1;
  @FOR(CITY(J) | J#GT#1#AND#J#NE#K:
    U( J) >= U( K) + X( K, J) -
    (N - 2) * (1 - X( K, J)) +
    (N - 3) * X(J, K); ););
@SUM(CITY(J) | J#GT#1: X( 1, J)) >= 1;
@FOR( LINK: @BIN( X ); );
@FOR( CITY( K) | K #GT# 1:
  @BND( 1, U( K), 999999);
  U( K) <= N-1 - (N-2) * X( 1, K); );
```

END

En el árbol de mínima expansión, tenemos que encontrar un conjunto de enlaces (un árbol) en una red que conecta todas las ciudades. Por otra parte, la suma de las distancias sobre todos los enlaces del árbol debe reducirse al mínimo. Entre otras cosas, esta aplicación es útil en la construcción de redes de comunicaciones a un costo mínimo.

La desventaja del modelo lineal para este tipo de problema es la complejidad según el tamaño de la red, dado que el número de nodos crece, el número de iteración de variables enteras también crecen y restan eficiencia al solver del programa. Para las grandes versiones sería prudente buscar alternativas tales como la heurística o programación dinámica. A continuación realizamos la programación para el norte del río Santa Cruz, RF2.

```

RF2:
MODEL:
SETS:
    CITY /1..16/: U;
    LINK( CITY, CITY):
        RF2,X;

ENDSETS
DATA:
    RF2 = MATRIZ 2

ENDDATA
N = @SIZE( CITY);
MIN = @SUM( LINK: DIST * X);
@FOR( CITY( K) | K#GT#1:
    @SUM( CITY( I) | I#NE#K: X( I, K) )=1;
    @FOR( CITY( J) | J#GT#1#AND# J #NE# K:
        U( J) >= U( K) + X( K, J) -
            ( N - 2) * ( 1 - X( K, J) ) +
            ( N - 3) * X( J, K); ););
@SUM( CITY( J) | J #GT# 1: X( 1, J) )>= 1;
@FOR( LINK: @BIN( X); );
@FOR( CITY( K) | K #GT# 1:
    @BND( 1, U( K), 999999);
    U( K) <= N-1 - (N-2) * X( 1, K); );
END
    
```

Finalmente, una vez que se ha compilado y ejecutado los modelos con los datos correspondientes, obtendremos dos redes: RF1 que representa los campos de cultivo ubicados al norte del río Santa Cruz y RF2 que representa los campos de cultivo al sur del río. Con estos datos podemos obtener el total de metros de manguera necesarios para cubrir los campos de cultivo buscando cubrir todos los campos empleando una cantidad mínima de metros de manguera y el mejor aprovechamiento de agua.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Empleando el algoritmo de Prim y la programación en lingüo, se ha llegado a obtener el árbol de expansión mínima que conecta todos los nodos. EN este caso los nodos representan el

punto de distribución secundario hacia las hectáreas de cada cultivo. A continuación se muestra la distancia mínima por cada reservorio fuente primario:

RESULTADO DE ÁRBOLES DE EXPANSIÓN MÍNIMA

Considerando un costo de S/ 58. por metro de manguera, se tiene el resultado que se aprecia en la tabla I:

Tabla I
Costo de reservorio en nuevos soles

RESERVORIO FUENTE	ÁRBOL	UNIDADES
RF1	7660	metros
RF2	2880	metros
TOTAL	10540	metros
Precio promedio de manguera	58.00	soles por metro
COSTO TOTAL	S/. 611,320.00	soles

El resultado que se está llegando, enfocando la optimización de extensión de mangueras a los puntos de distribución de cultivos, es de S/. 611,320.00. Los costos de equipos de riego por goteo son constantes debido a que depende de la cantidad de nodos de distribución. El costo hallado es considerable para cualquier proyecto de este alcance. Si es que no se realizaba el diseño de red óptima, el costo se inflaría mucho más. En ese sentido presentar un proyecto que optimice la red es relevante para obtener financiamiento de empresarios o del mismo Estado.

El alcance de este proyecto es de envergadura mediana, por lo que proyectos de mayor envergadura, los costos serían críticos si es que no se analiza la red óptima. En la Figura 5 se muestra el árbol de expansión mínima por reservorio fuente ubicado a los costados del río Santa Cruz, en rojo se indican las rutas seleccionadas por el algoritmo de Prim así como la división por sectores original de los campos de cultivo del área.

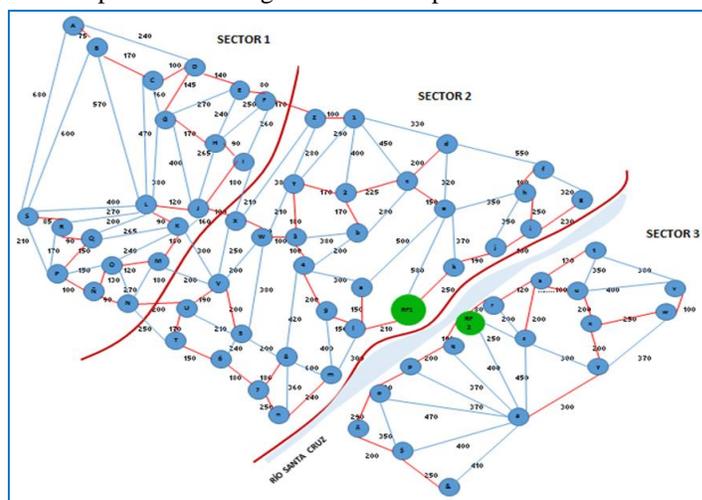


Fig. 5 Red óptima de tuberías

V. CONCLUSIONES

A continuación se brinda las principales conclusiones del proyecto:

Se concluye que el riego por goteo, aparte de priorizar un uso eficiente de agua en la agricultura, es un sistema que necesita una red de distribución óptima empleada para el riego por goteo para reducir los costos de manguera y equipos de flujo de agua.

Se concluye que el algoritmo de Prim es un método sencillo de aplicar directamente, sin la necesidad de un código de programación. Este último es más complicado establecer la tabla de distancias entre nodos, incluso esto se intensifica cuando no todos cada nodo se conecta con muchos otros. En ese sentido el algoritmo de Prim facilita los posibles cambios que se den de los nodos de distribución secundarios, para un manejo más sencillo del cambio de datos. A partir del monto del costo por mangueras, S/. 611,320.00, se ha establecido que es un monto importante en el tema de costos. En ese sentido, para presentar cualquier tipo de proyecto de esta línea, es importante considerar utilizar el algoritmo de Prim para la optimización de extensión, que a la vez tiene su repercusión en los costos del proyecto.

Antes de esbozar el grafo de árbol de expansión mínima, se debe posicionar los nodos de distribución secundario de forma estratégica, dependiendo del tipo de cultivo y otros factores como seguridad y accesibilidad.

Se recomienda considerar los futuros cambios en el tipo de cultivo. Esto debido a que no siempre se cultiva las mismas semillas, sino que depende mucho de la demanda de productos del mercado.

Se recomienda realizar un árbol de expansión mínima para llegar a los nodos de distribución de inicio de cultivo, denominados distribución secundaria, debido a que el uso de mangueras es siempre constante debido a que se extiende a lo largo y ancho del terreno.

Por último, se recomienda invertir en la aplicación del sistema de riego por goteo. Por un lado, por el uso eficiente del agua y; por el otro, económicamente viable a mediano y largo plazo.

REFERENCIAS

- [1] Temas Mundiales – Agua, ONU.
<http://www.un.org/es/globalissues/water/>
- [2] Riego por Goteo
https://es.wikipedia.org/wiki/Riego_por_goteo
- [3] G. Megh & P. Panigrahi (2016). Sustainable micro irrigation design systems for agricultural crops : methods and practices
- [4] Hillier, F. S. & Lieberman, G. J. (2010). Introducción a la investigación de operaciones. México, D.F.: McGraw-Hill.

- [5] Taha, H. A. (2012). Investigación de operaciones. Naucalpan de Juárez.
- [6] Winston, W. L. (2005), Investigación de operaciones: Aplicaciones y algoritmos. México: Thomson.
- [7] Prim, R. (1957). Shortest Connection Networks and Some Generalizations. The Bell System Technical Journal 36, pp 1389 - 1401.
- [8] Lindo Systems, (2015). Lingo: The modeling language and optimizer. Pag 806.
- [9] Krajewski, L., Ritzman, L., & Malhotra, M. (2013). Operations management. Upper Saddle River, N.J: Pearson.
- [10] Olivera, A. (2004). Heurísticas para Problemas de Ruteo de Vehículos. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo. : Uruguay.
- [11] Prins, C. (2003). A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem. ScienceDirect - Computers & Operations Research, 31 (2004), pp 1985 – 2002