

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS

PRÁCTICA DIRIGIDA

**AUTOMATIZACIÓN DE UN SISTEMA DE IRRIGACIÓN POR GOTEO
AUTOCOMPENSADO MEDIANTE UN CONTROLADOR DE VÁLVULAS
HIDRÁULICAS ACCIONADAS POR SEÑAL DE RADIO**

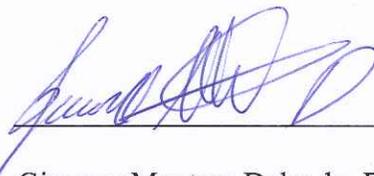
GIOVANY MONTERO DELGADO

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio
San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica

Marzo, 2021

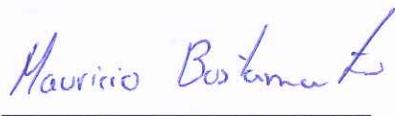
APROBACIÓN

El presente trabajo final de graduación ha sido sometido a la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la escuela de Ingeniería Agrícola y de Biosistemas, como requisito para optar por el grado, así como título de Licenciado en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas.



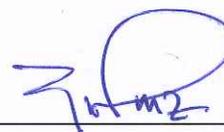
Ing. Giovany Montero Delgado, Bach.

Candidato



Ing. Mauricio Bustamante Román, Ph.D.

Director, Comité Asesor



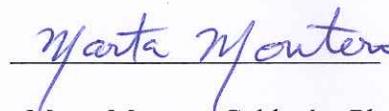
Ing. Gustavo Díaz Gutiérrez, M.A.E.

Miembro, Comité asesor



Ing. Matías A. Chaves Herrera, M.Sc.

Miembro, Comité Asesor



Ing. Marta Montero Calderón, Ph.D.

Presidente, Tribunal Examinador



Dr. George Govaere Vicaroli, Ph.D.

Lector, Tribunal Examinador

DEDICATORIA

A mis padres Isabel y Rafael.

A mis hermanos Evelin y Andrés.

AGRADECIMIENTOS

A Netafim Costa Rica, por darme la oportunidad de trabajar en un tema que me apasiona, especialmente al departamento de ingeniería: Ing. Iván Guzman, Ing. Willie Peña, Ing. Christian Solis, Ing. Carlos Carpio, Ing. Adrián Vargas, Ing. Pablo Chacón e Ing. Alejandro Salazar, por los consejos y comentarios para que este proyecto sea lo que es hoy.

A la Universidad de Costa Rica, a la Escuela de Ingeniería de Biosistemas y al sistema de becas que sin su ayuda esto no sería posible.

Al director del proyecto Mauricio Bustamante y a los lectores Matías A. Chaves y Gustavo A. Díaz, por su amistad y educación a lo largo de los años.

A mis mejores amigos y compañeros de apartamento durante toda mi vida universitaria: Olger Ramírez, Walter Barrantes, Jimmy Vargas, Joseph Arroyo y Jeifer Ureña, por todas las anécdotas vividas a lo largo de los años.

A Monserrat G. Retana por escucharme, aconsejarme e inspirarme durante tantos años.

Contenido

<i>DEDICATORIA</i>	<i>iii</i>
<i>AGRADECIMIENTOS</i>	<i>iv</i>
<i>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</i>	<i>viii</i>
<i>INDICE DE TABLAS</i>	<i>ix</i>
<i>ÍNDICE DE ABREVIATURAS</i>	<i>x</i>
<i>RESUMEN</i>	<i>xii</i>
<i>CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN</i>	<i>1</i>
1.1 Justificación	1
1.2 Planteamiento del problema	3
1.3 Objetivos	5
1.3.1 Objetivo general	5
1.3.2 Objetivos específicos	5
<i>CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO</i>	<i>6</i>
2.1 Conceptos	6
2.1.1 Red de riego	6
2.1.2 Riego por goteo	7
2.1.3 Diseño agronómico	8
2.1.4 Diseño hidráulico	9
2.2 Elementos presentes en un sistema de riego	11
2.2.1 Válvulas hidráulicas y su funcionamiento	12
2.2.2 Relé hidráulico	15
2.2.3 Válvula solenoide	17
2.3 Automatización	18

2.3.1	Niveles de gestión de procesos _____	20
2.3.2	Módulos de control _____	21
2.3.3	Principios de funcionamiento. _____	22
2.3.4	Criterios de diseño _____	25
2.4	Estudios topográficos _____	29
2.5	Análisis espacial _____	32
2.5.1	Complemento QNEAT3 _____	33
2.5.2	Complemento análisis de visibilidad _____	34
<i>CAPITULO 3. METODOLOGÍA</i> _____		37
3.1	Definición e interpretación de parámetros necesarios para la automatización __	37
3.1.1	Caracterización de la finca _____	37
3.1.2	Parámetros de trabajo del sistema automatizado de riego por goteo _____	39
3.1.2.1	Desnivel _____	39
3.1.2.2	Presión restante _____	39
3.1.2.3	Distancias _____	40
3.1.2.4	Comunicación _____	40
3.2	Utilización del procedimiento actual de La Empresa _____	41
3.2.1	Datos de entrada necesarios para el procedimiento actual _____	41
3.2.2	Descripción del procedimiento de diseño actual de La Empresa _____	42
3.3	Procedimiento propuesto para el diseño de la automatización _____	45
3.3.1	Preparación de datos de entrada _____	45
3.3.2	Descripción del procedimiento de diseño propuesto _____	47
<i>CAPITULO 4. RESULTADOS</i> _____		54
4.1	Parámetros necesarios para la automatización del sistema de riego por goteo __	54
4.1.1	Caracterización del sistema hidráulico y finca _____	54

4.2	Resultados de la implementación del procedimiento actual utilizado por La Empresa	61
4.3	Resultados de la implementación del procedimiento propuesto	68
4.4	Comparación de métodos	80
	<i>CONCLUSIONES</i>	85
	<i>RECOMENDACIONES</i>	86
	<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	87
	<i>APÉNDICE</i>	91
	Apéndice A. Diseño agronómico del sistema de riego	91
	Apéndice B. Diseño hidráulico del sistema de riego por goteo	94
	<i>ANEXOS</i>	101
	Anexo A: Resultados sin filtrar	101
	Anexo B: Separación entre nodos de la red.	111
	Anexo C: Código del algoritmo.	116

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Esquema típico de un sistema de riego presurizado.	7
Ilustración 2. Variables que interaccionan para determinar el potencial productivo de un cultivo.	10
Ilustración 3. Partes de una válvula hidráulica de control serie 100.	13
Ilustración 4. Válvula hidráulica con válvula de 3 Vías.	14
Ilustración 5. Relé hidráulico normalmente abierto.	16
Ilustración 6. Relé hidráulico normalmente cerrado.	17
Ilustración 7. Puertos de una válvula solenoide.	18
Ilustración 8. Niveles de gestión de procesos en proyectos de automatización.	21
Ilustración 9. Unidad Terminal Remota instalada en campo.	23
Ilustración 10. Esquema de automatización.	24
Ilustración 11. Matriz OD desde puntos como líneas.	33
Ilustración 12. Análisis de cuenca visual acumulado.	36
Ilustración 13. Ubicación de la finca de cítricos.	38
Ilustración 14. Diagrama de procedimiento actual utilizado por La Empresa.	44
Ilustración 15. Diagrama del procedimiento propuesto.	53
Ilustración 16. Sistema hidráulico de riego de la finca.	55
Ilustración 17. Longitudes de tubería principal.	59
Ilustración 18. Modelo de elevación utilizado.	60
Ilustración 19. Proyecto de automatización de la finca.	66
Ilustración 20. Resultados del plugin QNEAT3.	72
Ilustración 21. Ingreso de la base de datos al algoritmo.	74
Ilustración 22. Trazado de rutas del algoritmo mediante iteraciones.	75
Ilustración 23. Resultado del análisis, las iteraciones 66 y 105.	76
Ilustración 24. Análisis de visibilidad para el resultado obtenido con el algoritmo de selección.	78
Ilustración 25. Plano final resultante del diseño hidráulico.	99

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resortes de compensación topográfica en caso de trabajar con pendientes negativas en comando hidráulico.....	27
Tabla 2. Capas utilizadas en Qgis.....	46
Tabla 3. Valores de entrada propuestos para este proyecto.....	48
Tabla 4. Criterios de diseño del algoritmo de selección.....	51
Tabla 5. Caracterización de las válvulas hidráulicas de control.....	56
Tabla 6. Diseño de la automatización con el método original, ubicación de los RTU.....	61
Tabla 7. Diseño de la automatización con el procedimiento actual; comprobación de presiones.....	63
Tabla 8. Listado de materiales utilizando la metodología de la empresa.....	67
Tabla 9. Verificación de presión y desnivel con procedimiento propuesto para antenas en válvula 1 y válvula 2.....	69
Tabla 10. Enlaces que cumplen con los tres parámetros definidos por el usuario.....	73
Tabla 11. Cuadro de operación, resultado del algoritmo de selección.....	76
Tabla 12. Listado de materiales utilizando la metodología estandarizada.....	79
Tabla 13. Comparación del listado de materiales entre métodos.....	82
Tabla 14. Datos disponibles para el diseño del sistema de riego.....	92
Tabla 15. Corroboración de datos calculados por el departamento de ingeniería de Netafim.....	93
Tabla 16. Reporte de presiones y caudales de bombeo.....	95
Tabla 17. Resultados con el método propuesto.....	101
Tabla 18. Tabla de atributos QNEAT3.....	111

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

RTU	Unidad Terminal Remota, por sus siglas en inglés
NMC	Centro de Gestión de Red, por sus siglas en inglés
ETC	Evapotranspiración de cultivo en condiciones estándar
C H&W	Coefficiente de Hazen Williams
Fr	Frecuencia de riego
Ln	Lámina Neta
Lb	Lámina Bruta
na	Eficiencia de aplicación
Sg	Separación entre goteros
Sl	Separación entre laterales
Q	Caudal
Td	Tiempo disponible
Tr	Tiempo de Riego
Nop	Número de operaciones
Qop	Caudal de operación
Pp	Precipitación
Arop	Área de Operación
TED	Relé de compensación topográfica, por sus siglas en inglés
PVC	Policloruro de vinilo

HG	Hierro galvanizado
DEM	Modelo de elevación digital, por sus siglas en inglés
LiDAR	Detección de luz y rango, por sus siglas en inglés.
NASA	Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio, por sus siglas en inglés.
PE	Polietileno
SIG	Sistemas de información geográfica
mca	Metros de Columna de Agua
msnm	Metros Sobre el Nivel del Mar
m ³ /h	Metros cúbicos por hora
gpm	Galones por minuto
psi	Libras por pulgada cuadrada

RESUMEN

El uso sostenible del agua en la agricultura es uno de los grandes retos del siglo actual. Para ello, surgen nuevas tecnologías que facilitan el monitoreo y el control de los campos agrícolas. Un uso incorrecto de estas nuevas herramientas puede llevar a un sobre o sub-dimensionamiento del sistema de automatización debido a que el problema no se planteó correctamente desde un inicio. El propósito de este proyecto fue diseñar un procedimiento genérico para el desarrollo de proyectos de automatización de válvulas hidráulicas en sistemas de riego, utilizando señales de radio y comando hidráulico. El procedimiento genérico propuesto, además de funcionar como una guía sobre los aspectos por considerar en un diseño de automatización, establece una metodología que asegure una utilización óptima de los recursos y un funcionamiento adecuado del sistema de riego.

Como base del procedimiento propuesto, se diseñó el sistema de automatización de las válvulas de riego de una finca dedicada a la producción de cítricos; la finca consta de 284 hectáreas, en las cuales se distribuyen 40 válvulas de riego, controladas mediante el sistema *RadioNet* de Netafim.

Se detalló el comportamiento de la red hidráulica de la finca y se definieron las variables por considerar en un diseño de automatización: 1) la presión de trabajo en el microtubo de polietileno, 2) la diferencia de altura, 3) la distancia entre las unidades terminales remotas (RTU) y las válvulas a automatizar, 4) pendientes negativas y positivas entre esos dos puntos y 5) la línea de vista entre el centro de control de la red y las RTU en campo.

Adicionalmente, y como elemento comparativo, se utilizó el método tradicional utilizado por la empresa Netafim¹ (referido como “La Empresa” en este documento) para validar y tener un punto de referencia para el mejoramiento del proceso por parte del ingeniero encargado del proyecto.

El nuevo método incorpora factores de seguridad al diseño y crea una base de datos de toda la red hidráulica. Debido a la gran cantidad de información generada, se diseñó un algoritmo de selección cuyo objetivo es indicar la ubicación y cantidad de RTU para todo el proyecto.

La comparación de métodos actual y propuesto permitió verificar que realizar un análisis más exhaustivo de toda la red hidráulica, en donde se consideren la totalidad de las posibilidades, puede llevar a una disminución en la cantidad de RTU, así como de paneles solares, baterías, antenas y el conjunto de elementos necesarios para realizar la conexión a tierra, esto se traduce en un ahorro de capital.

¹ La Empresa referida en este documento, es una compañía de venta, diseño e instalación de sistemas riego donde el autor de este documento obtuvo información y datos para la elaboración de la metodología propuesta.

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

Alrededor del 40 % del total de los alimentos a nivel mundial se produce bajo condiciones de riego controlado, en donde se trata de aplicar la menor cantidad de agua posible según la tecnología o método que se utilice en la finca. Del total del agua dulce consumida mundialmente, un 70 % es destinada para la producción de alimentos, llegando incluso a valores del 95 % en algunos países, es por esto por lo que uno de los mayores desafíos del siglo actual es el uso sostenible del agua (Ruiz Canales & Molina Martínez, 2010). Desde el año 1970, el aumento en los rendimientos de cereales se atribuye únicamente a la revolución verde, incluyendo las nuevas variedades de semilla y a la expansión del terreno; además, reportes han establecido que no se esperan nuevas variedades en un futuro cercano que satisfagan la demanda de alimentos de los próximos años (Wahlin & Zimbelman, 2014). Es fácil notar que la población mundial, aún en manera desacelerada, sigue en aumento. La agricultura con riego inteligente puede ser la solución a los actuales y futuros problemas de rendimiento en productividad alimentaria, solventando en cierta medida la demanda creciente de alimentos y la escasez de fuentes de agua.

La automatización por lo general es implementada en las últimas etapas de los diseños de sistemas de riego y generalmente aplicada en fincas en donde existe una gran distancia de separación entre las válvulas, con el objetivo de mejorar tiempos de operación e incrementar la eficiencia del uso del agua. Wahlin y Zimbelman (2014) explican que “la modernización de sistemas de riego es una combinación de mejoras técnicas, de gestión y organizativas de esquemas de irrigación con el objetivo de mejorar la utilización de recursos” (p.1). La automatización, una consecuencia del mejoramiento del método, se define como la aplicación automática del control de los procesos (Taopanta, 2015).

La automatización es un medio fundamental para poder aplicar el agua en el momento más adecuado según la evolución de las necesidades de cultivo y en la cantidad necesaria, permitiendo alcanzar niveles altos de eficiencia en el uso del agua, la energía y los fertilizantes.

En sistemas de automatización en riego, se han aplicado metodologías que definen las variables necesarias para un adecuado funcionamiento del sistema. Debido a que cada terreno es distinto y el comportamiento de una red hidráulica depende de varios factores, las metodologías utilizadas se resumen en la prueba y el error. El objetivo de estas metodologías es verificar que la presión del sistema sea la suficiente, esto transforma el diseño de la automatización en un proceso repetitivo y desgastante, además de lento.

El estudio para este trabajo final de graduación **presenta una mejora en la metodología de automatización de sistemas de riego, incorporando sistemas de información geográfica y algoritmos capaces de escoger el mejor resultado con base en una matriz de información generada a partir de la totalidad de los resultados.** Se incorporan etapas en el diseño cuyo objetivo es asegurar que los resultados sean utilizables en campo, además de incrementar la rapidez en la toma de decisiones por parte de los usuarios encargados de utilizar la tecnología. Es una metodología adaptable a distintos escenarios siempre y cuando se utilice el radio control como forma de comunicación y el comando hidráulico como mecanismo de apertura y cierre de válvulas.

1.2 Planteamiento del problema

El diseño de sistemas de riego involucra dos etapas principales: 1) Etapa de diseño agronómico e hidráulico, y 2) Etapa de diseño de control y automatización. Se requiere que el diseño planteado en la segunda etapa no tenga modificaciones considerables ocasionadas por la adopción de subsistemas en la etapa 1. No obstante, comúnmente en la práctica es requerida una verificación *in situ* que conlleva cambios en los sistemas instalados.

En la práctica, los diseños de automatización están condicionados a la experiencia del diseñador y no completamente a los cálculos específicos, lo cual puede llevar a un sub o sobre dimensionamiento del sistema. Por esta razón la metodología de instalación basada meramente en criterios numéricos es necesaria, con el objetivo de aprovechar al máximo los recursos disponibles.

El trabajo realizado en este documento tiene como base una metodología que realiza una empresa, es un método de prueba y error utilizado para seleccionar la ubicación del sistema de automatización, lo cual ha presentado una serie de inconvenientes debido a que se suele adquirir una cantidad mayor de equipo del que realmente se necesita; por lo cual, surge la necesidad de presentar una metodología novedosa que agilice el proceso mientras se propone un diseño funcional y optimizado.

Esta investigación está enfocada en crear una nueva metodología que considere el diseño hidráulico previamente concebido y que adapte el sistema de automatización de radiocontrol sin realizar modificaciones a sistemas previamente instalados. Esta nueva metodología de control responde a las características topográficas del terreno y a la topología de la red hidráulica, para corroborar que las presiones del sistema sean las correctas y que la cantidad de radio antenas sea el mínimo. Así mismo, se plantea que todas las válvulas reguladoras funcionen acorde al turno de riego correspondiente, corroborando que el tiempo total de riego sea el adecuado y que la lámina de agua distribuida sea la necesaria.

La automatización por comando hidráulico puede ser llevada a cabo siempre y cuando se cuente con información básica proveniente de un sistema de riego localizado de alta frecuencia (RLAF). Cada proyecto de automatización se fundamenta en un diseño hidráulico y a su vez este se elabora a partir del diseño agronómico de la finca, en donde se consideran factores como necesidad de agua de la planta, el tipo de suelo, el clima, la calidad de agua y la programación de riego. El sistema de riego es seleccionado considerando además la topografía del terreno, la fuente de agua, la disponibilidad de energía en la finca y el costo final del proyecto. Son estas las razones por las que para ejecutar con éxito un proyecto de automatización, el diseñador debe de ser capaz de interpretar la información proveniente del diseño hidráulico y con ello comprender al menos algunos conceptos clave.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Implementar una nueva metodología que simplifique y normalice el diseño de la automatización en proyectos de riego a presión, tomando como ejemplo el sistema de riego por goteo de una finca de cítricos ubicada en San Carlos, Nicaragua.

1.3.2 Objetivos específicos

- Definir e interpretar los parámetros necesarios para automatizar una red de riego por goteo autocompensado mediante el sistema inalámbrico de control y monitorización Radionet.
- Utilizar el procedimiento actual en el diseño de la automatización del sistema de riego de la finca de cítricos San Pancho para la determinación de mejoras en los procesos de cálculo.
- Diseñar una metodología nueva de instalación semiautomática de antenas RTU (Unidad de Terminal Remota) que permita normalizar y simplificar la elaboración de esta en futuros proyectos.

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Conceptos

Los sistemas de RLAF se pueden agrupar en tres grandes categorías considerando el caudal por unidad de emisor: aspersión, microaspersión y goteo. Aunque como categorías poseen atributos muy distintos, el principio de funcionamiento es el mismo en todos. El agua impulsada desde una bomba es distribuida a través de una red de tubos, válvulas y emisores hasta hacerla llegar a la zona de interés: la raíz de la planta. La tasa a la que se entrega ese caudal varía dependiendo del emisor utilizado, así como varía también su eficiencia, presión, precio y demás. El diseño de estos sistemas a presión consiste en una serie de cálculos interrelacionados, en donde se verifica la presión, pérdidas y velocidades en distintos puntos de la red, si el diseño hidráulico cumple con las características del diseño agronómico, la primera etapa de diseño se da por finalizada.

2.1.1 Red de riego

La ilustración 1 describe el esquema típico de un sistema de riego por goteo además de sus componentes. Primeramente, se inicia desde una o varias fuentes de agua (acuífero, pozo, canal o reservorio); una bomba presuriza el agua a la red de distribución a alta presión, seguido el agua pasa a través de los tanques de fertilización y los tanques de filtrado. El agua se distribuye a través de una tubería principal hasta alcanzar sectores de riego o áreas de operación funcionalmente independientes. Una vez se pasa este punto, comienza la tubería secundaria (Tubería distribuidora en imagen 1) y el agua es transportada hasta los hidrantes de agrupación los cuales son sectores de riego con control común de presión y caudal. Desde ahí, la red terciaria o lateral conduce el agua a través de la parcela, entregándola con ayuda de un emisor de riego, en este caso goteros auto compensados (Ruiz Canales & Molina Martínez, 2010), un gotero autocompensado permite entregar el mismo caudal igualando la

presión independientemente de su localización. Al conjunto de unidades de riego que riegan simultáneamente desde un mismo cabezal de riego se denomina unidad operacional de riego.

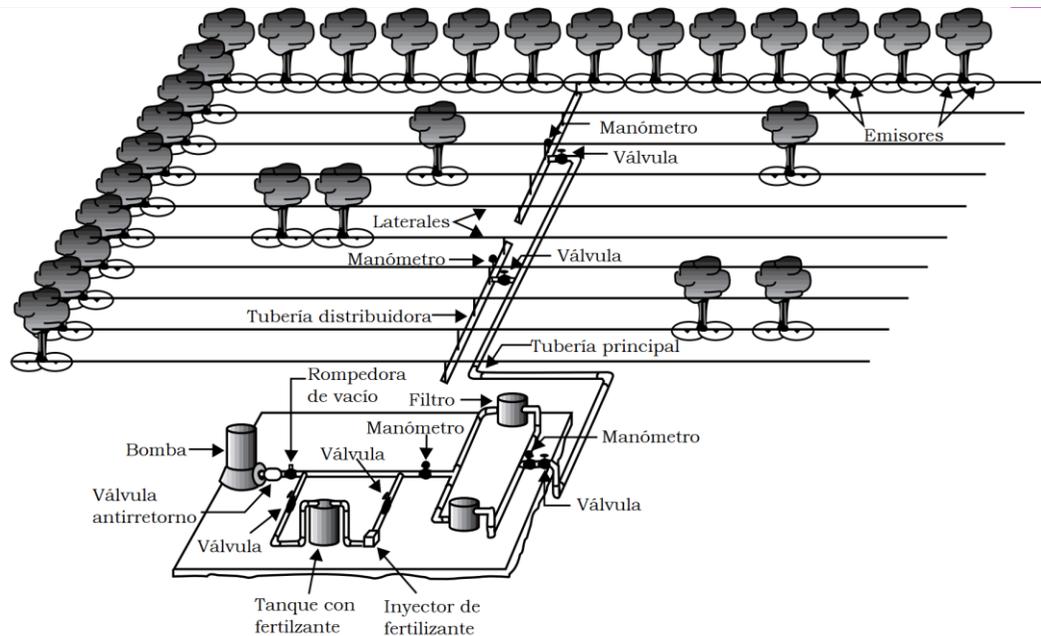


Ilustración 1. Esquema típico de un sistema de riego presurizado.

Fuente: (United States Department of Agriculture, 1997)

2.1.2 Riego por goteo

En el riego por goteo el agua es aplicada a cada planta separadamente en pequeñas, frecuentes y precisas cantidades a través de goteros. Es una variante del riego localizado, que permite una óptima aplicación del agua, esta se infiltra en el suelo creando un bulbo mojado directamente sobre la zona de influencia radicular. En comparación con otros métodos de irrigación, el goteo posee ciertas ventajas tales como un mejor aprovechamiento del agua, una mayor uniformidad del riego, mayor facilidad de automatización, ahorro de mano de obra y un incremento en la disponibilidad de cultivos a sembrar, el área plantada está sólo parcialmente mojada. El caudal unitario máximo que separa al riego por goteo de

los otros RLAF es 24 L/h (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2007).

A su vez, existen ciertas ventajas al automatizar un sistema de riego por goteo sobre otros métodos de riego. El riego localizado se adecua mejor a la automatización debido a que las redes de tuberías (principales, secundarias y terciarias) son fijas, los caudales suelen ser bajos, no existen efectos negativos por parte del viento, hay un mejor dominio de la dosis del riego, y debido a que es automatizado existe la posibilidad de riego nocturno, lo que permite consumir energía eléctrica durante las horas de menor costo; adicionalmente se facilita el registro de datos y también la obtención de estadísticas.

2.1.3 Diseño agronómico

El diseño agronómico es la base para obtener la información necesaria para la construcción del diseño hidráulico. Un diseño agronómico inadecuado puede llevar a una insuficiencia de humedad en el suelo o al contrario humedecer demasiado hasta desperdiciar agua y arruinar la raíz de las plantas (Pizarro, 1996); en esta etapa del proyecto se decide la cantidad y distribución de los emisores de riego.

Para elaborar un diseño agronómico se deben primero definir algunos factores como: el área de la finca, el tiempo disponible de riego, el requerimiento hídrico del cultivo y la separación entre laterales y emisores, los cuales se definen dependiendo de la separación que exista entre filas de árboles y árboles respectivamente. Una vez definidos, es posible calcular una lámina neta de riego, la precipitación total del emisor, el tiempo de riego, el número de operaciones, el área a regar por operación y el caudal teórico necesario.

2.1.4 Diseño hidráulico

El principal objetivo de un buen diseño es proveer la suficiente capacidad para satisfacer adecuadamente las necesidades de agua de los cultivos. La uniformidad de la aplicación depende de la uniformidad de descarga del emisor, del mantenimiento del sistema y de las elevaciones de la superficie. Una descarga no uniforme es causada por diferenciales de presión debido a la fricción, taponamiento, cambio de elevación y variabilidad de los materiales y equipos (United States Department of Agriculture, 1997), el uso de goteros auto compensados alivia el cambio de elevación en los terrenos debido a la manera en la que están diseñados.

Además del diseño agronómico, el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (1997) describe cierta información básica necesaria para el planeamiento y diseño de un sistema, en la lista se incluye:

- Un mapa topográfico con curvas de nivel cada 0.6 m – 1.5 m que incluya la forma del campo, el diseño, dimensiones y elevaciones de puntos clave.
- Tipo y textura del suelo, su capacidad de retención de agua, agotamiento permisible y el volumen de suelo a humedecer.
- El tipo, tamaño, ubicación, espacio y densidad de plantas.
- La cantidad, calidad, ubicación de la fuente de agua.
- Sistema de filtrado y dispositivos de sedimentación.
- El tipo y ubicación de la fuente de poder.
- Sistema de bombeo.
- Visión a futuro que incluya la manera en la que maduran los árboles, nuevas plantaciones o distintos cultivos en caso de que se cultive en rotación.
- El nivel de automatización y operación deseado, así como las habilidades de gestión disponibles.

En la sección 2.4 se describen algunos métodos utilizados para la obtención del mapa de elevaciones o curvas de nivel, información realmente importante para diseñar con éxito un sistema de automatización.

Existen entonces muchos factores a tomar en consideración para construir un sistema de riego, la ilustración 2 presenta la interacción de esas variables. El diseño de estos sistemas es un proceso iterativo en donde se debe de satisfacer las demandas del cultivo y solicitudes del agricultor.

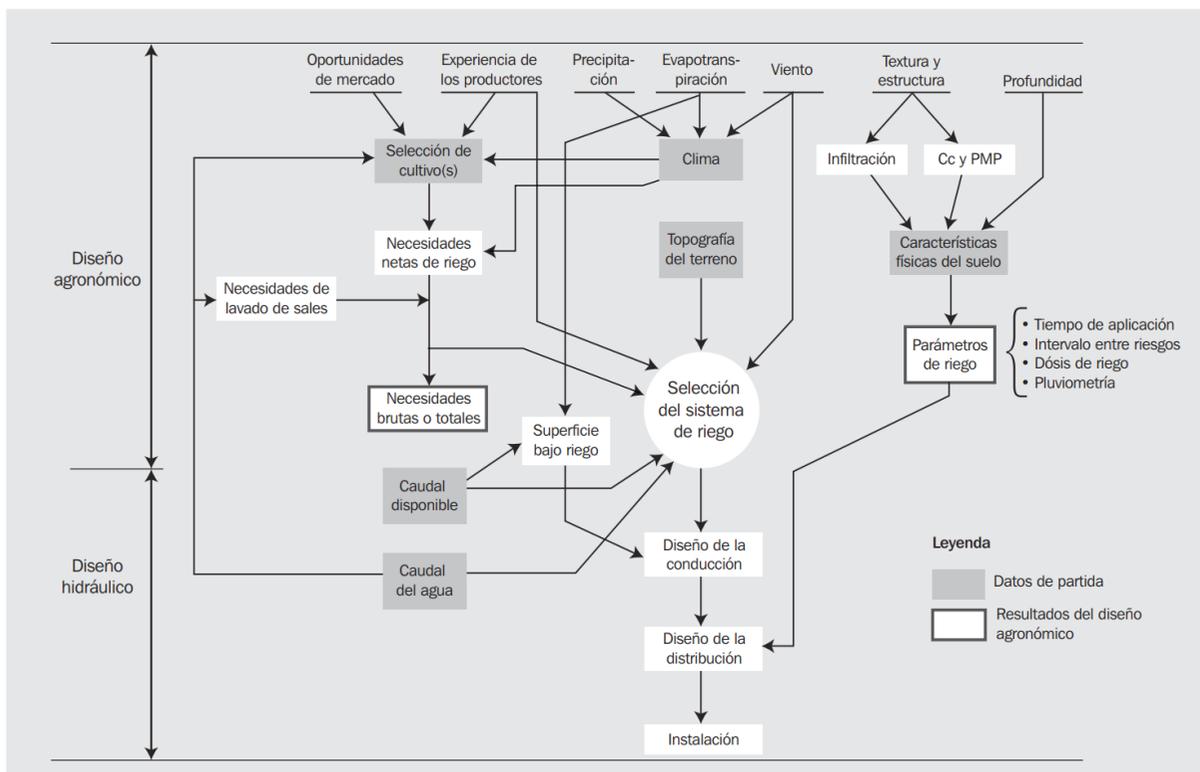


Ilustración 2. Variables que interaccionan para determinar el potencial productivo de un cultivo.

Fuente: (Carrazón, 2007)

2.2 Elementos presentes en un sistema de riego

Se llama *cabezal de riego* al elemento central de la instalación, es la ubicación en donde se encuentra la bomba que mueve el agua hacia la red de riego, el equipo de fertilización, los tanques de filtrado y el equipo de automatización, aunque la variedad de accesorios varía según el caso. Además de esos elementos, un cabezal puede contar con otros dispositivos que automatizan las funciones del mismo cabezal, como por ejemplo la aplicación de fertilizante, limpieza de filtros y registro de caudales. El equipo de automatización es capaz de regular la presión mediante las válvulas hidráulicas, limita el caudal, elimina el aire dentro de la tubería, cierre en caso de averías y algunas cosas más (Pizarro, 1996).

Existen 6 tipos de materiales utilizados comúnmente en las tuberías de conducción de agua: PVC (policloruro de vinilo), PE (polietileno), fibrocemento, hormigón, fundición y acero (Pizarro, 1996). En los sistemas de riego se utilizan PVC, PE y fibrocemento. Algunos factores que influyen en la selección de tuberías son la presión nominal, presión de trabajo, diámetro nominal y espesor medio.

La presión nominal (P_n) de una tubería sirve para tipificar tanto tubos como piezas especiales. Es la presión interior máxima que resiste una tubería al paso del agua medida a una temperatura de 20 °C. La presión de trabajo (P_t) es el valor de presión interna máxima a la que en servicio puede estar sometido un tubo a la temperatura de utilización (Moya Talens, 2009).

El diámetro nominal (D_n) es el diámetro exterior teórico declarado por el fabricante que sirve de referencia para designar por medidas los distintos elementos de una conducción acoplables entre sí (Pizarro, 1996). El espesor medio (e_m) es la media aritmética de los valores equidistantes de espesor de pared del tubo. Un concepto muy utilizado en tuberías es la relación de dimensión estándar o SDR que define como la relación entre el diámetro exterior promedio especificado y el espesor de pared mínimo especificado de una tubería

(Harrys, 2006), con un valor alto de SDR la pared del tubo es delgada en comparación con el diámetro del tubo, un valor bajo de SDR produce lo contrario.

Las tuberías de polietileno presentan ciertas ventajas con respecto a las tuberías de PVC en los sistemas de RLAF, tales como que se pueden instalar al aire libre, son flexibles y mucho menos frágiles. El menor esfuerzo tangencial de trabajo para un mismo D_n y P_n lleva a que su espesor sea mayor y por ende también su precio, además los accesorios para las tuberías de PE suelen ser más caros (Pizarro, 1996).

Las propiedades del PE dependen de su peso molecular, densidad y distribución. Estas propiedades se ven alteradas según su variedad y comercialmente se pueden encontrar tres de ellas: Polietileno de baja densidad (LDPE), Polietileno de media densidad (MDPE) y Polietileno de alta densidad (HDPE), el más utilizado en los sistemas de riego localizado son los LDPE por su mayor flexibilidad (Moya Talens, 2009).

2.2.1 Válvulas hidráulicas y su funcionamiento

Una válvula es un mecanismo que abre y cierra el paso del agua en respuesta a una orden hidráulica o neumática, en combinación con otros mecanismos pueden actuar como reguladores de presión, limitadores de caudal, válvulas volumétricas y al adicionárseles un solenoide pueden responder a órdenes eléctricas (Ruiz Canales & Molina Martínez, 2010). Las válvulas hidráulicas pueden ser normalmente abiertas, que se cierran al recibir una orden hidráulica, o normalmente cerradas, que se abren a recibir dicha orden. Las válvulas generalmente se activan por diafragma (Ilustración 3) o por pistón, además pueden ser de cámara simple o cámara doble. Las de cámara doble no necesitan muelle o resorte por lo que funcionan a presiones muy bajas de aproximadamente 2-3 mca (Ruiz Canales & Molina Martínez, 2010).

PIEZAS Y MATERIALES

#	PIEZA	MATERIAL	OPCIONAL*
1	Cuerpo	Hierro fundido	Hierro dúctil, Bronce, Acero inoxidable
2	Tapa	Hierro fundido	Hierro dúctil, Bronce, Acero inoxidable
3	Diafragma**	Caucho natural	NBR, EPDM, Neopreno
4	Resorte	SST 302	SST 316

* Piezas opcionales para resistencia especial
 ** Amplia selección en rangos de presión

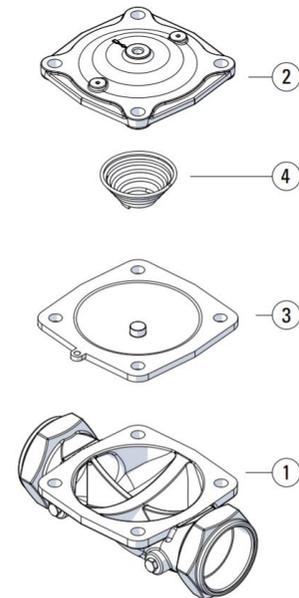


Ilustración 3. Partes de una válvula hidráulica de control serie 100.

Fuente: (Netafim, 2018)

El accionamiento de las válvulas hidráulicas puede ser de manera manual o remota; una válvula se puede accionar remotamente interconectando cables eléctricos, neumáticamente, hidráulicamente, mediante radio o telemetría infrarroja (United States Department of Agriculture, 1997), siendo los métodos remoto hidráulico y remoto eléctrico los más utilizados en los proyectos de automatización. El método manual se realiza mediante una válvula de 3 Vías y es generalmente utilizado en equipos donde existen pocas válvulas de campo, las mismas están a cortas distancias o los turnos de riego u operaciones son de muy baja frecuencia. En la ilustración 4 se describe a detalle el funcionamiento de una válvula de cámara simple accionada manualmente por una válvula de 3 Vías.

El interior de las válvulas hidráulicas de cámara simple está dividido por un diafragma que puede desplazarse hacia arriba y hacia abajo. En la posición más baja, tal y como está en la ilustración, el diafragma se apoya en un asiento cerrando totalmente el paso del agua, la posición más alta corresponde a la máxima de la válvula, permitiendo por

completo el paso del agua. La zona superior posee una abertura la cual se conecta a la válvula de tres Vías. Por su parte, la válvula de 3 Vías posee 4 aberturas; el puerto presión que es una entrada, el puerto venteo que es una salida, el tercer puerto se reserva para una conexión con otro dispositivo y un puerto que se conecta a la cámara de la válvula permitiendo la entrada o la salida de agua, la perilla en la válvula de 3 Vías permite seleccionar entre el puerto presión y el puerto venteo.

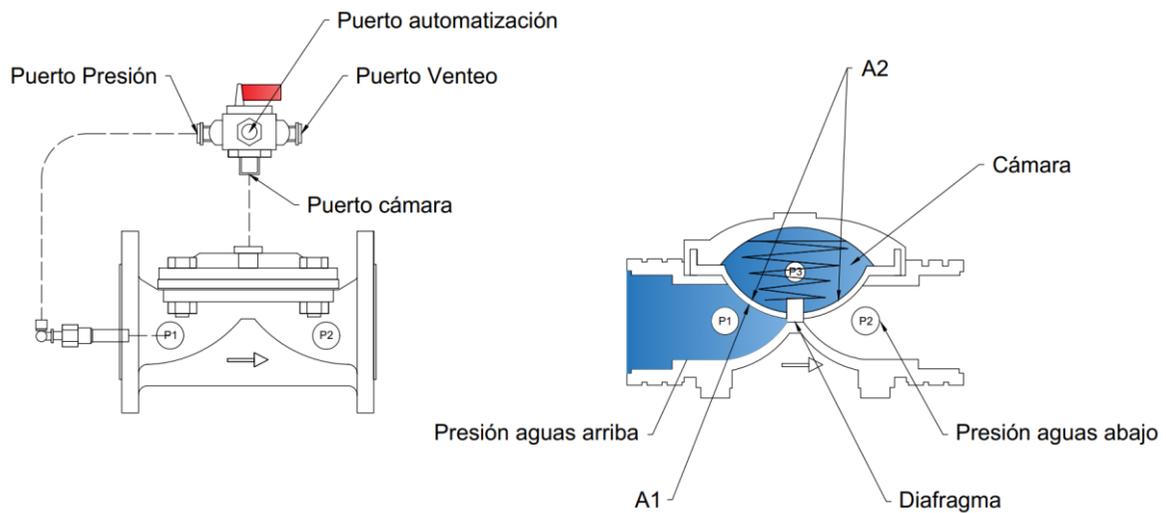


Ilustración 4. Válvula hidráulica con válvula de 3 Vías.

La apertura o cierre de la válvula depende de si existe o no comunicación entre el punto P1 y la cámara de la válvula, esa comunicación la proporciona la válvula de 3 Vías. Para cerrar la válvula hidráulica se introduce agua a presión del P1 en la cámara de tal manera que la ecuación de fuerzas resultantes sea $P_3 \cdot A_2 > P_1 \cdot A_1$, esto provoca que el diafragma se desplace hacia abajo interrumpiendo el paso del agua. Para abrir y permitir el paso de agua por la válvula hidráulica, se cambia de posición la válvula de 3 Vías cerrando el puerto presión y comunicando el puerto cámara con el puerto venteo, esto hace que el agua de la cámara salga a la atmosfera y que la presión de la cámara sea igual a la presión atmosférica, dejando como ecuación resultante $P_1 \cdot A_1 > P_3 \cdot A_2$.

La configuración descrita es la más sencilla y comúnmente utilizada para la apertura y cierre de una válvula, existen decenas de configuraciones que permiten modificar el comportamiento de la válvula, permitiendo por ejemplo regular la presión o modificar el caudal, para ello, es necesario utilizar más actuadores como válvulas piloto, relés hidráulicos y válvulas solenoides. En este proyecto se le dará especial atención a la activación remota de una válvula con relé hidráulico y señales de radio, el esquema de control más popular utilizado en riego agrícola es la combinación de un relé hidráulico con un piloto reductor de presión. En un diseño de automatización, es indiferente si existe o no una válvula piloto reductora de presión, aunque estas pueden desempeñar un papel importante si se utilizan como compensadores topográficos, asegurando el funcionamiento del sistema incluso en terrenos con pendiente.

2.2.2 Relé hidráulico

El relé hidráulico es un dispositivo que se instala sobre una válvula de campo. Este recibe una señal de baja presión y la amplifica, tiene una función similar a la válvula de 3 Vías. El relé hidráulico conmuta por el aumento o disminución de la presión en el microtubo de PE que conduce la señal (Rizzi, 2020), de esta manera, permite que el agua con presión entre o salga de la cámara de control de la válvula y que la misma sea cerrada o abierta de manera automática. El relé hidráulico posee una presión equivalente de trabajo de hasta 12 kg/cm², admite la instalación de un resorte en su interior que funciona como compensador topográfico, el relé se puede configurar como abierto, cerrado o automático.

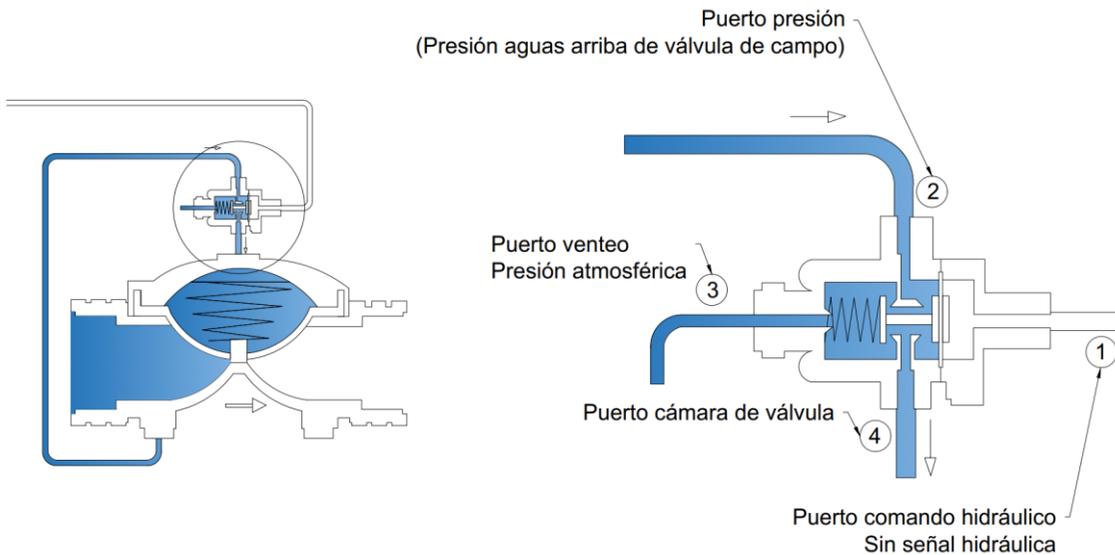


Ilustración 5. Relé hidráulico normalmente abierto.

Tomando como referencia la ilustración 5, un relé hidráulico normalmente abierto da como resultado una válvula de campo normalmente cerrada. Para que un relé hidráulico esté abierto, no debe de estar activa la señal de presión en el puerto comando ①, de esta manera el relé hidráulico comunica el puerto presión ② con el puerto cámara ④ de la válvula hidráulica, provocando que el diafragma baje y la válvula se cierre evitando el paso del agua. Contrariamente, un relé hidráulico normalmente cerrado (Ilustración 6) da como resultado una válvula de campo normalmente abierta, esto sucede si existe una señal hidráulica en el puerto comando ①. Si existe una señal hidráulica con una presión que sea mayor al menos al 80 % de la presión en el puerto presión ② el relé hidráulico se activa (Rizzi, 2020) y comunica el puerto cámara ④ con el puerto venteo ③ provocando que el diafragma de la válvula suba y la válvula de control se abra permitiendo el paso de agua.

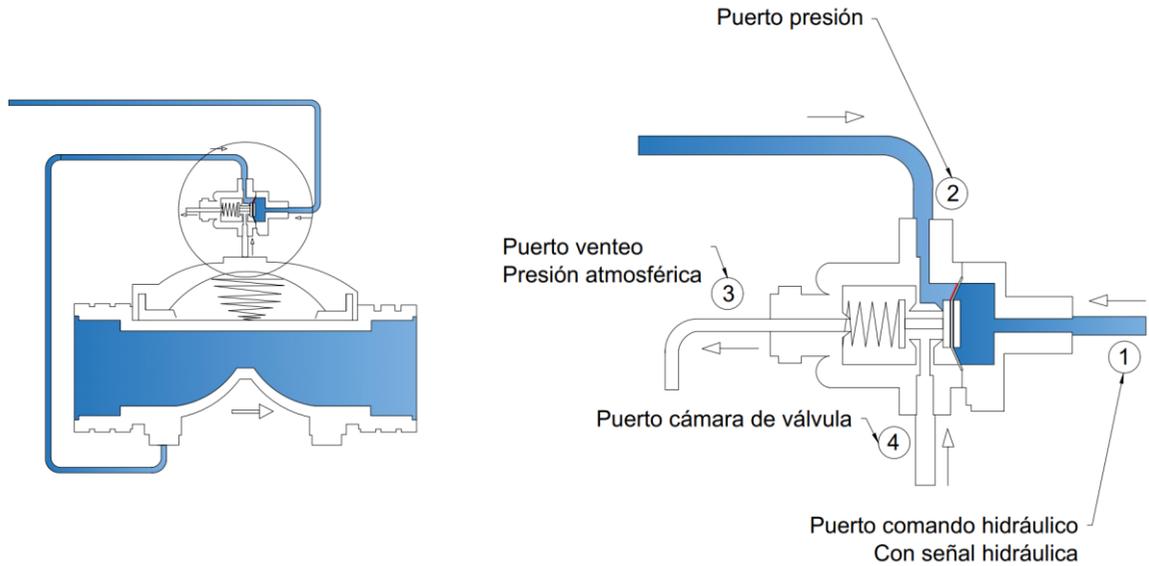


Ilustración 6. Relé hidráulico normalmente cerrado.

2.2.3 Válvula solenoide

Las válvulas solenoides (Ilustración 7) son operadas por una bobina y son utilizadas cuando se desea realizar la apertura de una válvula de campo de manera remota. Cuando se recibe una señal eléctrica, se crea un campo magnético que levanta un émbolo, esto permite que el agua fluya a través de los orificios en el solenoide (Netafim, 2018). El solenoide utilizado en los proyectos de automatización suele poseer tres puertos, el puerto presión (A) como entrada y como salidas el puerto venteo (B) y el puerto posterior (C). El puerto posterior es el encargado de conectar el puerto presión del solenoide con el puerto de comando del relé hidráulico con el objetivo de abrir una válvula de campo. Tal y como muestra la ilustración 7, varios solenoides pueden utilizar la misma presión como presión de trabajo del puerto presión, basta con utilizar una “Tee” que vincule todos los puertos entre sí.

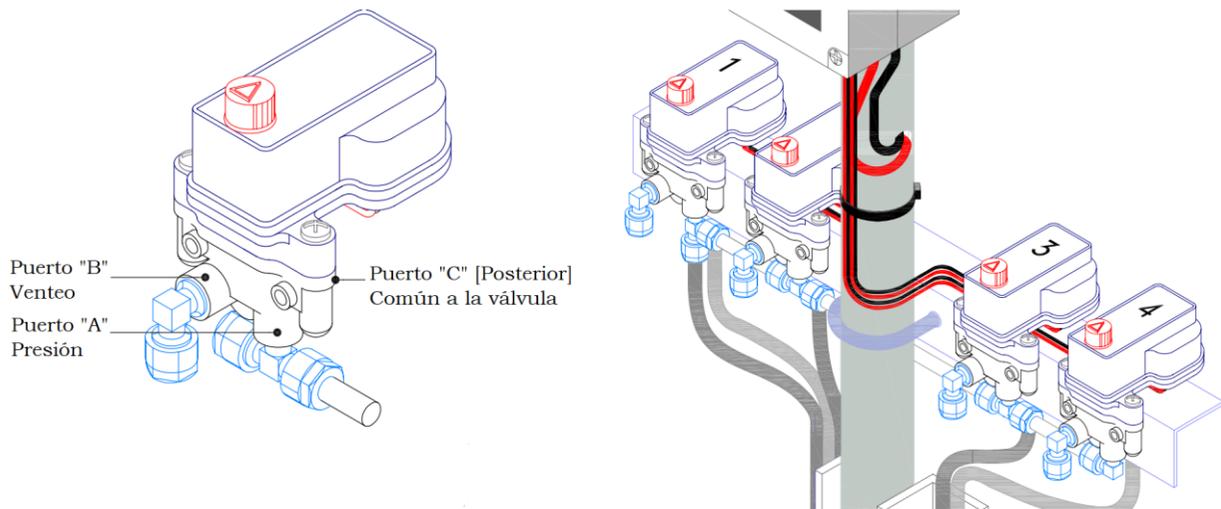


Ilustración 7. Puertos de una válvula solenoide.

Fuente: (Netafim, 2010).

2.3 Automatización

La modernización de los sistemas de riego responde a la necesidad de lograr un aprovechamiento más racional del recurso hídrico en la agricultura, facilitando la entrada de nuevas tecnologías de riego. Los proyectos de modernización en riego suelen incluir dos tipos de actuadores y este proyecto se enfoca en uno de ellos.

El primero son las obras variadas, las cuales consisten en una serie de trabajos que se suelen realizar en los sistemas de riego para mejorar su eficiencia. Algunos ejemplos son la capacidad y el revestimiento de los sistemas de distribución abiertos, la canalización de tuberías a presión de sistemas de transporte y distribución, la modulación en los hidrantes de consumo, el acondicionamiento de sistemas de drenaje, la mejora de la red de caminos de servicio y la adecuación de los sistemas de aplicación en parcela, atendiendo a las características productivas de cada zona (Ruiz Canales & Molina Martínez, 2010).

El segundo de los actuadores y al que se le dará especial atención, es la implantación de sistemas de operación y control en las infraestructuras hidráulicas, sobre todo en las redes de distribución, de forma que se ejecuten de manera remota y se permita supervisar de forma automática su funcionamiento (Ruiz Canales & Molina Martínez, 2010).

Existen distintos niveles de automatización que van desde la apertura y cierre manual de las válvulas hasta la total automatización de las operaciones. La elección del nivel se basa en criterios económicos, formación del personal, garantía de funcionamiento, características de la finca y la existencia o no de energía eléctrica. Canales y Martínez (2010) describen que el nivel de automatización alcanzado hace referencia a la cantidad de funciones asumidas por el sistema, en donde el mínimo nivel de automatización es la apertura y cierre de válvulas hidráulicas para distribuir el agua o llevar acabo los turnos de riego y el máximo nivel es el control total de la instalación (la humedad del suelo) del estado hídrico de la planta y del clima, incluyendo los sistemas de adquisición de datos para una adecuada gestión del riego y la fertilización.

Las redes de sensores se han utilizado para monitorear gran variedad de parámetros o condiciones ambientes en contextos marinos, de suelo y atmosféricos. Entre esos parámetros se pueden incluir humedad, presión, temperatura, contenido de agua en el suelo y radiación (Oliveira & Rodríguez, 2011; Lee, Fang, Lee, & King, 2012). En el área de la agricultura se utilizan para monitorear el clima, el contenido de humedad, la temperatura del suelo, su fertilidad, el contenido de minerales y para la detección de enfermedades, monitoreando por ejemplo la temperatura de la hoja y la tasa de crecimiento de la planta (Wang, Zhang, & Wang, 2006; Chaudhary, Nayse, & Waghmare, 2011).

2.3.1 Niveles de gestión de procesos

Canales y Martínez (2010) explican que los sistemas de automatización cuentan generalmente con tres niveles de gestión de procesos (Ilustración 8). En el primer nivel se encuentra el centro de control, que es el encargado de recibir y almacenar los datos de la totalidad de la red hidráulica como valores de presión o caudal, además muestra los parámetros de funcionamiento del sistema.

El segundo nivel consta de las estaciones concentradoras que se suelen ubicar en puntos estratégicos de la red de riego, estas captan la información proveniente del centro de control y de forma autónoma se encargan de su ejecución actuando como programadores de riego. Estos sistemas tienen la capacidad de captar datos de la red y de su propio funcionamiento para enviarlos al centro de control o a las estaciones del tercer nivel pues pueden funcionar como repetidoras de señal almacenamiento y reenvío (SAF: Store and forward).

En el último nivel se encuentran las estaciones remotas (RTU), que ejecutan en tiempo real las órdenes recibidas de las estaciones concentradoras o del centro de control. Esta arquitectura tiene una explicación, ante una avería en el centro de control las estaciones concentradoras continúan funcionando normalmente, lo mismo sucede con los RTU, ante cualquier eventualidad en el segundo nivel, estas continúan almacenando información evitándose la pérdida de datos. Para que se dé la transferencia de datos es necesario un método de comunicación, esa comunicación se puede dar mediante un cable o con señales de radio.

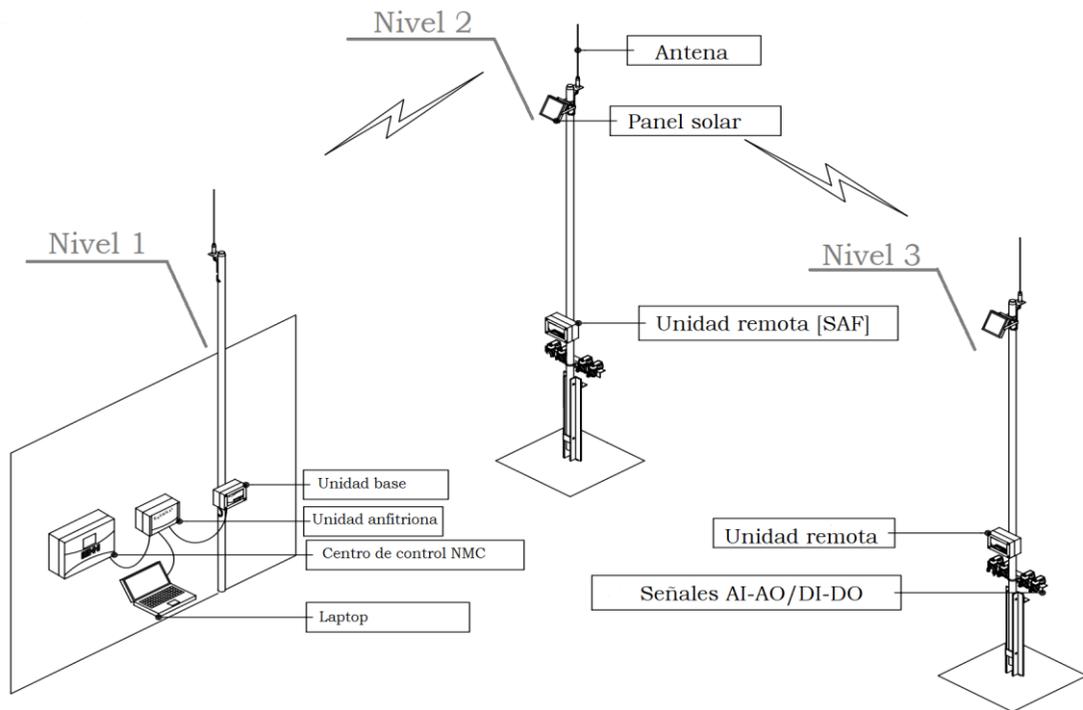


Ilustración 8. Niveles de gestión de procesos en proyectos de automatización.

Fuente: (Netafim, 2009).

2.3.2 Módulos de control

Los módulos de control por cable necesitan de un maestro de zona o equipo en donde resida la capacidad del proceso (nivel 1 en Ilustración 8). Poseen ciertas ventajas como la eliminación de los paneles solares, un costo reducido por punto de control y escaso impacto visual. Sin embargo, el coste del cableado es muy alto, los puntos de control no poseen capacidad de procesamiento, en caso de rotura puede dejar fuera de servicio grandes zonas y la distancia de cobertura es mucho menor a la lograda con comunicación por radio (Ruiz Canales & Molina Martínez, 2010).

Los controladores por radio se basan en microcontroladores comunicados por señales de radio y con capacidad de almacenamiento, para su comunicación también se puede utilizar telefonía móvil. Admiten entradas y salidas analógicas y digitales y son de bajo consumo, también pueden funcionar alrededor de un año utilizando baterías (Ruiz Canales & Molina Martínez, 2010), aunque se acostumbra la instalación de paneles solares como fuente de alimentación. Como ventajas, estos sistemas poseen dimensiones reducidas, funcionamiento y procesamiento local de los RTU y los paneles solares a instalar son de baja potencia. Una desventaja es que la señal de radio se puede ver afectada por la topografía del terreno o las mismas plantas en caso de que posean gran altura, se puede conseguir una señal estable instalando la antena de radio 1 metro por encima de las copas de las plantas o árboles (Yunseop, Evans, & Iversen, 2008), Netafim (2009) recomienda que esa elevación sea de al menos 2 metros por encima de los árboles.

Los sistemas con cableado requieren mucho tiempo y costos elevados de instalación; además no se recomiendan para largas distancias y muchos productores no los aceptan pues pueden interferir con sus labores de campo, una comunicación sin cable provee una movilidad dinámica y una reubicación sin costo (Yunseop, Evans, & Iversen, 2008).

2.3.3 Principios de funcionamiento.

El equipo de automatización utilizado es el sistema de control y monitoreo inalámbrico *RadioNet*, los componentes del sistema se detallaron en la ilustración 8. En el manual de usuario Netafim (2009) se describe la función de cada dispositivo. La unidad *Host* o anfitriona funciona como una interfaz entre el sistema de control y la plataforma inalámbrica (la unidad de radio base y las RTU). La Unidad Base es la plataforma de comunicación por radio entre las RTU y el Host, es la encargada de almacenar el mapa de ruta de la red. Esta unidad puede administrar hasta 254 RTU de manera inalámbrica, incluida la opción de reenvío de información SAF.

Las RTU son las plataformas inalámbricas de entradas y salidas instaladas en campo, en la tarjeta base de estas se pueden instalar hasta cuatro tarjetas de expansión, pueden alcanzar un tamaño modular de 1, 3, 5, 7 y 9 salidas digitales y de 2 a 10 entradas digitales. Las antenas están instaladas en todas las unidades de radio y son las encargadas de transmitir o recibir señales electromagnéticas para transformarlas en corrientes eléctricas o viceversa. El panel solar se utiliza como parte del sistema de recarga automática de la batería. Cada sistema RadioNet se puede conectar a distintos dispositivos, ya sea que funcionen como entradas o como salidas. En las salidas se pueden configurar válvulas solenoides, bombas, filtros e inyectores de fertilizante. En las entradas se pueden instalar medidores de agua, medidores de fertilizante, interruptores de presión o alarmas (Netafim, 2010). La ilustración 9 muestra este conjunto componentes instalados en campo.

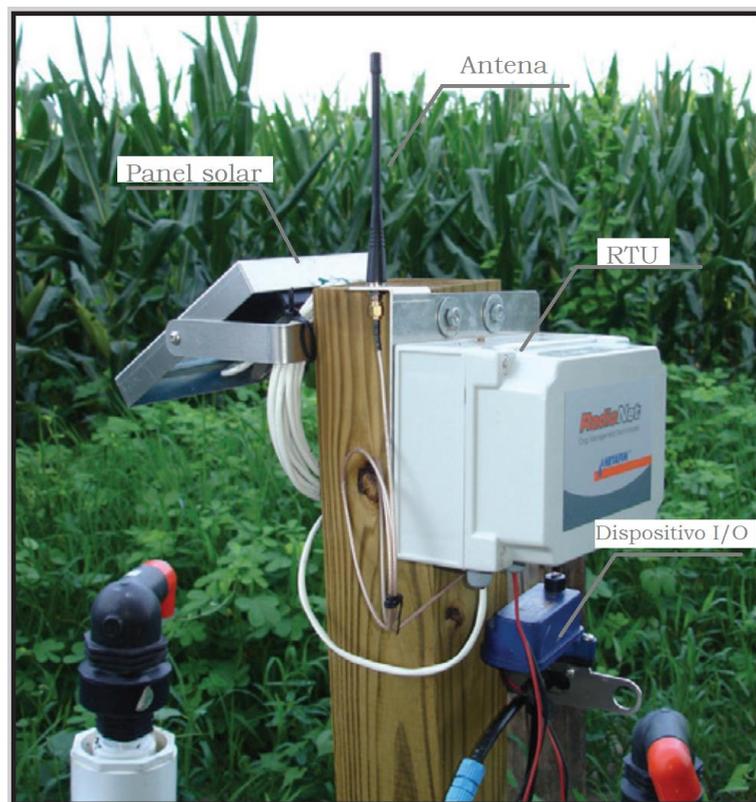


Ilustración 9. Unidad Terminal Remota instalada en campo.

Fuente: (Netafim, 2010)

El sistema RadioNet funciona bajo el mismo esquema de gestión de procesos de la sección 2.3.1 en donde el Centro de Manejo de Red (NMC) ejecuta un comando de activación hacia cada RTU según el turno de riego, ese RTU transforma las señales de radio en una corriente eléctrica la cual se utiliza para activar una válvula solenoide. Al activarse, la válvula solenoide permite el paso del agua a través de ella, generando una señal hidráulica e incrementando la presión en el tubo de PE que conecta con el relé hidráulico de la válvula que se desea abrir. Si se desea cerrar la válvula hidráulica, basta con enviar otra señal desde el NMC indicando la activación de la válvula solenoide para impedir la generación de la señal hidráulica (Ilustración 10).

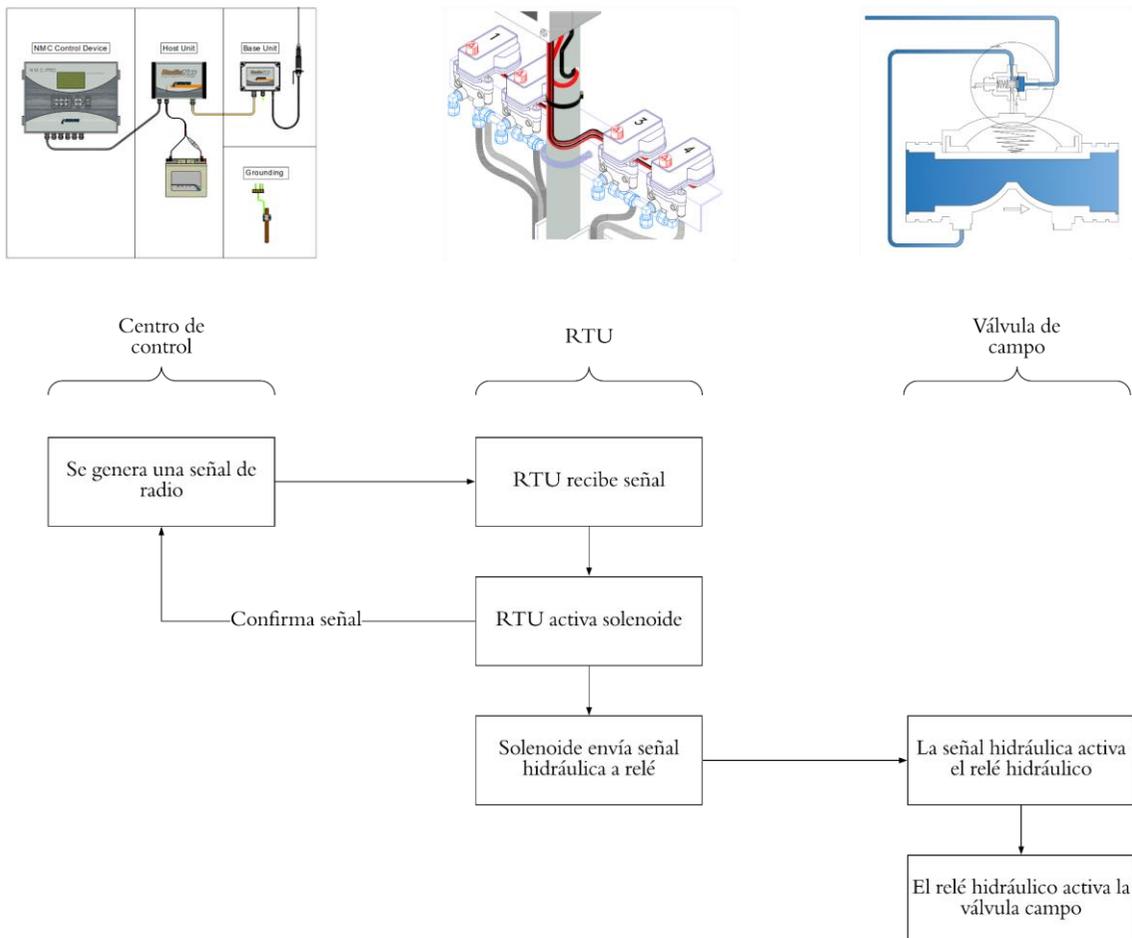


Ilustración 10. Esquema de automatización.

Para un correcto funcionamiento y un adecuado cumplimiento de las expectativas depositadas por el usuario del sistema, es necesario que éste cumpla una serie de requisitos. Entre los que se pueden mencionar están (Ruiz Canales & Molina Martínez, 2010): robustez de los elementos a instalar, seguridad de los sistemas de comunicación y procesamiento de datos, protección anti-vandalismo, autonomía, mantenimiento sencillo y económico y la posibilidad de incrementar la capacidad del sistema a futuro.

2.3.4 Criterios de diseño

En un diseño de automatización lo ideal es utilizar la menor cantidad de RTU, eso se traduce en una menor cantidad de materiales, lo que conlleva a una disminución en el costo final del proyecto. No obstante, existen distintos criterios o reglas que se deben de seguir para que el proyecto funcione con éxito, es muy normal que los RTU en campo no funcionen a su máxima capacidad modular, incrementando la cantidad de unidades en campo.

Entre los factores que interfieren en el diseño de un proyecto de automatización de válvulas accionadas mediante señales de radio y comando hidráulico, se pueden mencionar: la presión de trabajo en el tubo de PE, la diferencia de altura y la distancia entre el RTU y la válvula a automatizar, pendientes negativas y positivas entre esos dos puntos, el diámetro del microtubo de PE y la línea de vista entre el NMC y las antenas RTU en campo.

Según Rizzi (2020), el éxito en los sistemas de control remoto hidráulico se resume en tener suficiente presión en el puerto comando del relé, una presión no menor al 80% de la presión local del puerto presión (según se explica en la sección 2.2.2 de relés hidráulicos). La experiencia de instaladores en campo ha demostrado que el relé hidráulico es capaz de operar con sólo un 60% de presión, esto permite disminuir los costos del proyecto al incrementar la cantidad de válvulas que se pueden automatizar por RTU.

Netafim suele utilizar un 70% de presión como límite en sus diseños y generalmente la única verificación que se hace es asegurar valores de presión restante positivos, el diseño es aceptado aun cuando estos valores son positivos por una diferencia de décimas, comprometiendo la funcionalidad del sistema. Se puede proponer un valor de presión restante mínimo a criterio de diseñador y que no encarezca el proyecto.

Debido a que el tubo de PE está transportando presión a la cámara del relé hidráulico, la diferencia de elevación entre esos dos puntos cumple un papel importante. El término elevación se refiere a la distancia vertical entre un nivel de referencia, en este caso el RTU y un punto de interés. En un líquido homogéneo en reposo el cambio de presión, debido a un cambio de elevación, se calcula mediante la ecuación 1 (Mott, 2006). Si se toma el peso específico del agua como 9.81 kN/m^3 , cada unidad de h equivale a la misma cantidad de cambio de presión en unidades de mca.

$$\Delta p = \gamma \cdot h \qquad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

Δp : Cambio en la presión [kPa]

γ : Peso específico del líquido [kN/m^3]

h : Cambio de elevación [m]

El desnivel entre esos dos puntos puede ser positivo o negativo. Al verificar que el relé hidráulico cuente con la suficiente presión de trabajo, se debe de sumar o restar la presión estática que genera el agua en el tubo de PE debido a los cambios de altura. Esto genera dos situaciones en campo, 1) cuando el RTU se encuentra más elevado que la válvula a automatizar y 2) cuando el RTU se encuentra a una elevación menor a la válvula por automatizar.

Cuando sucede la primera situación, sin haber generado una señal de presión en el tubo de PE, el relé puede interpretar esa diferencia de elevación como una señal de presión y activarse abriendo la válvula de campo. En ese caso un resorte de compensación topográfica debe de ser añadido al relé con tal de compensar la presión estática en el tubo de control (Rizzi, 2020). En caso de que la diferencia de elevación negativa sea demasiado alta, mayor a 25 m, o no se quiera utilizar resortes en el relé, se recomienda utilizar una válvula piloto modelo 29 100 (Dorot, 2019) como relé hidráulico, los resortes suelen presentar problemas cuando superan los 10 m de desnivel negativo. Rizzi (2020) recomienda una serie de resortes compensadores de desnivel (Tabla 1), cuya constante de fuerza, la del resorte, varía en función a su color y estos se seleccionan tomando en consideración el rango de trabajo recomendados para los mismos.

Tabla 1. Resortes de compensación topográfica en caso de trabajar con pendientes negativas en comando hidráulico.

<i>Color de resorte</i>	<i>Valor de desnivel (m)</i>
<i>Amarillo</i>	5 – 10
<i>Verde</i>	10 – 15
<i>Blanco</i>	15 – 20
<i>Rojo</i>	20 – 25

En caso contrario, cuando el RTU se encuentra a una elevación menor que las válvulas de campo, en el momento en que se inhibe la señal de presión en el tubo de PE para conmutar el relé, es muy posible que el microtubo se desagüe por el puerto venteo del solenoide, incrementando los tiempos de apertura de válvula (Rizzi, 2020). Cuando se da este problema es posible solucionarlo mediante dos métodos, si la diferencia de elevación no es muy excesiva, entre 2 y 3 metros, basta con elevar el puerto venteo del solenoide a una altura mayor a la de la válvula en campo e igualar la presión estática en ambos puntos. En caso de que el desnivel sea tal que complique igualar la altura (mayor a 4 metros), se puede

utilizar un relé compensador topográfico (TED), este se instala en el tubo de PE justo después del solenoide. Al quitar la señal hidráulica, la válvula TED sólo permite el drenaje de una pequeña parte del agua del tubo de PE, suficiente para que el relé conmute de posición, evitando el desagüe completo del microtubo y mejorando los tiempos de respuesta de apertura de válvula (Rizzi, 2020).

La distancia que existe entre el RTU y la válvula es uno de los principales factores que afectan el diseño, las órdenes hidráulicas no son fiables a más de 200 - 300 metros (Ruiz Canales & Molina Martínez, 2010), no obstante, los instaladores en campo han demostrado que siempre y cuando no se superen los 500 metros de separación, el relé hidráulico puede ser activado siempre que se cuente con la presión necesaria. Mientras mayor sea la distancia de separación mayor será el radio de trabajo del RTU y por ende menor la cantidad final de ellos, sin embargo, distancias de separación muy extensas incrementan el tiempo de apertura de válvulas y la probabilidad de que el sistema no funcione. Rizzi (2020) recomienda que, en instalaciones con distancias de separación grandes, se generen “estaciones de chequeo” cada 200 o 250 metros. En caso de que los tiempos de apertura o cierre de las válvulas de control sean muy prolongados, se puede colocar un relé intermedio encargado de potenciar la presión en el tubo de PE.

Otra variable importante es el diámetro que se utiliza en el microtubo de PE. Netafim (2009) recomienda un diámetro mínimo de 8 mm, no obstante, Rizzi (2020) recomienda que el diámetro utilizado sea de 6 mm, esto por dos razones: la primera de ellas es el aire interno en el microtubo, un diámetro mayor incrementa la posibilidad de que se genere aire en él, y parte de la presión generada en el sistema hidráulico se gastará comprimiendo ese aire, incrementando los tiempos de apertura de las válvulas; la segunda razón es la expansión del PE, parte de la presión generada se gastará en expandir el PE. El microtubo de 8 mm posee mayor superficie específica y por ende mayor posibilidad de expandirse.

El último factor por considerar es la capacidad de comunicación entre las antenas de radio. Una señal de radio se puede interrumpir, entre otras cosas, por obstáculos como montañas, edificaciones, árboles u otras señales de radio (Ruiz Canales & Molina Martínez, 2010), es por esta razón que se debe verificar de que exista una línea de vista entre las antenas antes de que vayan a ser instaladas y así evitar colocar unidades RTU repetidoras de señal.

2.4 Estudios topográficos

Un estudio topográfico es conveniente para seleccionar alternativas para la planificación y diseño de sistemas de riego específicos, ayuda a determinar si se necesita una nivelación o reorganización intensiva de la tierra. Pequeños cambios en la elevación pueden tener grandes efectos en la uniformidad del riego cuando se utilizan sistemas a baja presión (United States Department of Agriculture, 1997). La existencia de muchos desniveles con profundidades mayores de 20 m impedirá el uso del PE o al menos obligará a combinar tramos en PE con tramos en PVC o HG en el sistema (Carrazón, 2007).

Un mapa topográfico con curvas de nivel cada 0.6 m – 1.5 m (valores recomendados por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (1997)) significarían horas extra de trabajo, equipo especializado o un incremento en los costos del proyecto. En algunas ocasiones agricultores o diseñadores no tienen acceso a esa información, lo que lleva a la utilización de herramientas o datos menos precisos, pero igualmente útiles.

El diseñador utiliza la información topográfica del terreno para mapear los diferenciales de presión en la red hidráulica, asegurar que la presión de trabajo de los laterales de goteo sea la correcta, agregar válvulas reguladoras de presión, entre otras cosas. En los diseños de automatización remoto hidráulico, las elevaciones de distintos puntos de la finca se utilizan para asegurar la apertura de una válvula de control. Una diferencia de altura de 1 m podría significar que una válvula hidráulica no se active impidiendo el riego de toda una zona.

Las elevaciones de la finca se suelen obtener mediante un estudio topográfico presencial o mediante herramientas SIG, en ambos casos dicha información se puede mapear en forma de curvas de nivel o líneas de contorno. Las curvas de nivel se definen como la representación de un espacio tridimensional en dos dimensiones, en donde se conectan puntos con una misma elevación. Cada línea de contorno representa una elevación distinta, cuando las líneas están muy unidas entre sí representan terrenos empinados mientras que si están muy separadas representan terrenos planos (Gul & Khan, 2010). Las líneas de contorno son comúnmente utilizadas en mapas tanto en formato digital como físico, por lo que la extracción y reconocimiento automático de estas es realmente importante para la generación de modelos de elevación digital.

Los modelos de elevación digital (DEM) son imprescindibles en el campo de las geociencias y se han utilizado ampliamente en la generación y visualización de terrenos tridimensionales. Los DEM se han aplicado para investigar la pendiente y el aspecto de un terreno, construir perfiles entre puntos seleccionados y delinear otras características significativas de la superficie (Rui, Yu, Lu, Ashraf, & Song, 2016). Se han propuesto varios métodos para la generación de información DEM mediante el uso de la teledetección, técnicas de fotogrametría, interferometría radar, altimetría laser, interpolación o digitalización de mapas (Wood & Fisher, 1993; Hearnshaw & Unwin, 1994). En los últimos años, la principal evolución se ha logrado en los sistemas de adquisición y las tecnologías de análisis y visualización (DEM, LiDAR, etc.) que han permitido el desarrollo de otros sistemas de representación (modelos 3D), aunque las líneas de contorno tradicionales siguen siendo ampliamente utilizadas (Mozas Calvache & Ureña Cámara, 2013). El valor de resolución espacial en el DEM determina el mínimo tamaño o extensión que es posible registrar en una imagen, objetos o coberturas que ocupen áreas menores a las indicadas para un píxel no son registradas (Marquina & Mogollón, 2018).

Los contornos, que están en formato vectorial o ráster, consisten en una gran cantidad de puntos de elevación y pueden ser generados a partir de información DEM, en consecuencia, se han desarrollado varios algoritmos de interpolación para generar DEM a partir de contornos (Rui, Yu, Lu, Ashraf, & Song, 2016). Tradicionalmente, estas líneas de contorno se obtenían mediante restitución fotogramétrica, mientras que hoy en día se obtienen a partir de sistemas de coincidencia fotogramétrica o LiDAR (Mozas Calvache & Ureña Cámara, 2013). Este acceso a la información facilita la utilización de herramientas SIG y el análisis espacial.

LiDAR es una técnica de medición de detección remota que utiliza las propiedades de dispersión y propagación de la luz por gases, líquidos y sólidos para inferir algunas de sus propiedades físicas (Leblanc, Trickl, & Vogelmann, 2013) siendo de los pocos métodos que obtienen precisiones menores a 1 metro. Estos datos se pueden obtener con la ayuda de equipos especiales como aviones, helicópteros, drones, satélites o trípodes, aunque en países desarrollados existen organismos gubernamentales que ofrecen su descarga de manera gratuita. Cuando no se tiene acceso a este tipo de tecnologías, los diseñadores suelen descargar información menos precisa de distintos servidores, por ejemplo, Google Earth o Global Mapper. Otra opción es la descarga gratuita de datos DEM sin procesar, provenientes de páginas gubernamentales como por ejemplo *Earth Data* de la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio (NASA) (NASA, 2020), existen diferentes formatos de archivos y su calidad puede variar dependiendo de la zona en donde se haga la búsqueda.

Un levantamiento topográfico suele ser una representación precisa de las elevaciones de la finca pues se conoce la elevación exacta de los puntos de interés. Su calidad para usos futuros en diseños de sistemas de riego depende, entre otras cosas, del detalle y separación entre las líneas de contorno.

Los componentes básicos de la calidad en los datos geográficos son la precisión posicional, la precisión temática, la precisión temporal, la coherencia lógica y la integridad (Mozas Calvache & Ureña Cámara, 2013). Datos de poca resolución o baja calidad significan elevaciones poco precisas, lo que lleva a un diseño hidráulico con un comportamiento alejado a la realidad y el posible fracaso del proyecto.

2.5 Análisis espacial

El análisis espacial es el proceso de examinar ubicaciones, atributos y relaciones de las características entre datos espaciales a través de la superposición y otras técnicas analíticas, con el objetivo de abordar una pregunta u obtener información útil (Proyecto QGIS, 2020). El geoprocetamiento básico es cualquier operación GIS utilizada para manipular datos, en donde el proceso típico se basa en tomar un juego de datos de entrada y devolver el resultado de la operación como un conjunto de datos de salida, también conocidos como datos derivados.

Crear, visualizar y administrar redes son parte importante en los SIG. Muchos tipos de infraestructuras físicas como carreteras o servicios públicos se pueden modelar como redes con líneas y nodos, cada uno con sus atributos característicos. De manera similar, un sistema de riego presurizado se puede visualizar como una red con líneas y nodos, en donde la tubería principal es representada mediante líneas y las válvulas hidráulicas mediante nodos. Esta metodología se introduce en este proyecto con el objetivo de comprender mejor el comportamiento de la red hidráulica en su totalidad y no solamente en puntos dispersos, para esto son utilizados los complementos *QNEAT3* y *Visibility Analysis*.

2.5.1 Complemento QNEAT3

Este complemento ofrece algoritmos avanzados para el análisis de redes que van desde simplemente calcular la distancia más corta entre dos puntos hasta áreas más complejas como las áreas Isócronas o zonas de servicio. Aunque estos dos algoritmos pueden ser de utilidad, en este proyecto se le dará especial atención a la Computación Matriz O-D o matriz de origen-destino.

La matriz origen-destino ofrece a su vez distintos algoritmos, entre ellos Matriz OD desde puntos como líneas. Este algoritmo calcula el costo basado en la ruta de la red (tubería principal) desde las relaciones origen destino entre los puntos (válvulas hidráulicas) dentro de una sola capa (n:n). La relación se muestra como líneas rectas entre esos puntos y es similar al ejemplo mostrado en la ilustración 11.

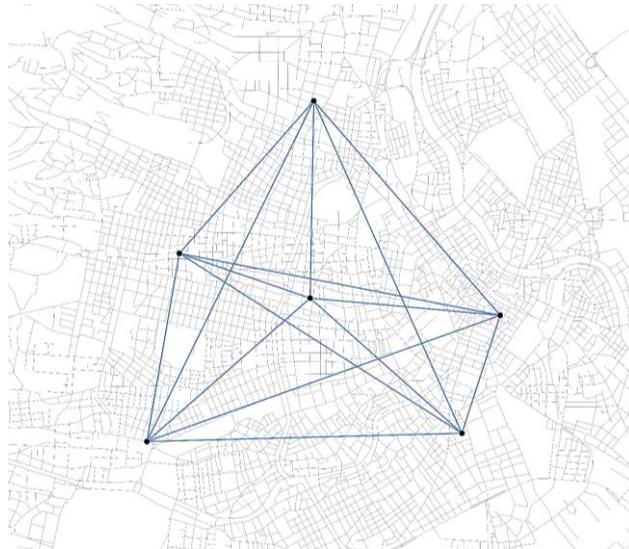


Ilustración 11. Matriz OD desde puntos como líneas.

Fuente: (Raffler, 2018)

Para poder hacer uso de este algoritmo existen una serie de parámetros obligatorios, así como opcionales. Entre los parámetros obligatorios se debe de contar con una capa de la red hidráulica cuya geometría debe de ser de tipo línea, dicha capa debe de estar construida ininterrumpidamente, sin cortes y en donde se represente acertadamente la red de tuberías instaladas en campo. Otro parámetro obligatorio es la capa de puntos, o válvulas a automatizar, identificadas con el mismo número utilizado en el diseño de riego. El tercer parámetro es el campo de ID de punto único que permite identificar cada punto una vez se dan las relaciones, por último, el criterio de optimización o estrategia de costos, en donde para este caso se selecciona *Shortest Path* u optimización de distancias. El resultado se resume en una tabla cuyos valores corresponden a la separación que existe entre cada uno de los nodos que se encuentran dentro de la capa de puntos.

2.5.2 Complemento análisis de visibilidad

El complemento de análisis de visibilidad es utilizado para calcular la superficie visible desde un punto de observación dado sobre un modelo de elevación digital. A su vez, el complemento permite análisis más complejos, como la generación de redes de intervisibilidad entre grupos de puntos, para este caso, las antenas RTU.

Con el objetivo de validar los resultados de este proyecto, son utilizados los algoritmos *Intervisibility Network* y *Viewshed Analysis* los cuales cumplen funciones distintas. Para cualquier caso, el primer paso es crear los *Viewpoints* de los puntos a analizar. Como parámetros obligatorios se debe de ingresar el DEM de la zona, la capa de puntos que representan a los RTU instalados y su identificación, el radio de análisis (en metros), la altura del punto cuando funciona como observador (en metros) y la altura del punto cuando funciona como objetivo (en metros). El resultado será un archivo de tipo *Geopackage* con nombres de campo estandarizados y se reproyectará para que coincida con el modelo de elevación utilizado.

El análisis de intervisibilidad construye una red en formato vectorial, de relaciones visuales entre dos conjuntos (NMC-RTU) de puntos o dentro de un solo conjunto (RTU-RTU). Para cada enlace, también se calcula la profundidad debajo/arriba del horizonte visible. Los datos derivados permiten validar la ubicación seleccionada para cada RTU en campo, permitiendo conocer si se puede dar una comunicación por radio NMC-RTU o RTU-RTU. Para llevar a cabo este análisis basta con indicar cual es la capa de puntos observadores y cuál es la capa de puntos objetivos, se debe de ingresar el DEM de la zona. Ambas capas de puntos debieron pasar antes por la rutina de estandarización *viewpoints*.

El *Viewshed analysis* o análisis de cuenca visual produce un mapa de visibilidad desde cada punto de observación ingresado al terreno. Se pueden generar tres datos derivados, sin embargo, se le da prioridad al visor binario, en donde se genera una capa ráster con valores 1 y 0, en donde 1 significa que esa porción de terreno es visible y 0 no es visible. Cuando se utilicen varios puntos de observación cada análisis visual se combinará, para este análisis basta con seleccionar un solo punto de observación, el NMC. La ilustración 12 muestra un ejemplo de un análisis de cuenca visual acumulado, las zonas más oscuras indican que pueden ser visibles desde varios puntos de observación. Un análisis similar permite conocer los puntos visibles en el terreno desde el NMC, pudiendo mover los RTU hasta un punto donde se pueda dar una comunicación por radio en el caso de que el RTU se encuentre completamente aislado.

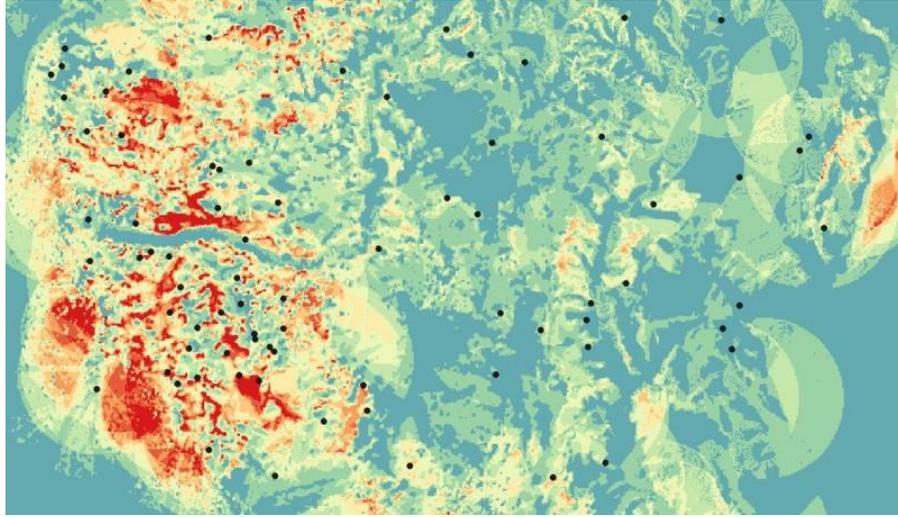


Ilustración 12. Análisis de cuenca visual acumulado.

Fuente: (Čučković, s.f.).

CAPITULO 3. METODOLOGÍA

En la presente sección, se explica a detalle los pasos necesarios que se deben realizar para el procedimiento que actualmente utiliza La Empresa y el procedimiento propuesto para mejorar el diseño de la automatización en un sistema de riego.

Se realizó una comparación del diseño del sistema de automatización en una finca de cítricos utilizando el procedimiento actual y el procedimiento propuesto en este trabajo final de graduación para estimar cambios en el equipo necesario y ejemplificar la secuencia de pasos propuestos

3.1 Definición e interpretación de parámetros necesarios para la automatización

En la siguiente sección, se desarrolla lo referente a la definición e interpretación de los parámetros necesarios para el diseño de un sistema de automatización de una red de riego. Dichos parámetros son la base para el procedimiento actual, y serán utilizados también para el procedimiento propuesto.

3.1.1 Caracterización de la finca

Para la demostración del procedimiento actual y propuesto, el diseño de automatización se realizará para un proyecto de riego por goteo auto compensado en una plantación de naranjas, ubicada en el municipio de San Carlos, Nicaragua, con un área total de 284 hectáreas. El terreno es muy próximo a la zona sureste del lago Cocibolca o Gran Lago de Nicaragua por lo que presenta una topografía plana (Ilustración 13), con elevaciones entre los 55 a 65 msnm.

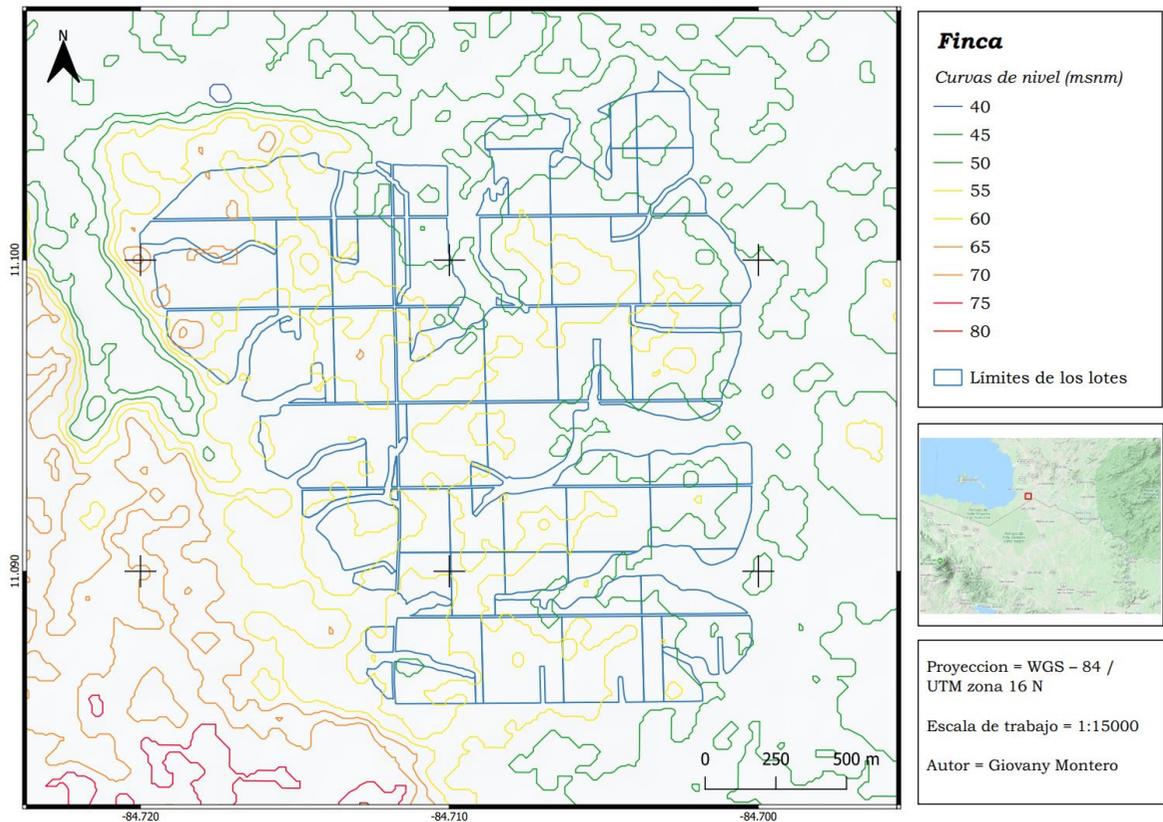


Ilustración 13. Ubicación de la finca de cítricos.

En el apéndice A de este documento se describe la información disponible de la finca para la realización de los cálculos del diseño agronómico, que no es parte del alcance de este trabajo final de graduación, pero es antecedente para la instalación hidráulica en el sistema de riego por goteo, así también una tabla en la que se demuestran los cálculos para dicho proceso.

Consecuente a esa sección, en el apéndice B se encuentra el diseño hidráulico del sistema de riego proveniente del software Irricad V17. Irricad entrega como resultado reportes de proyecto con información básica necesaria para la automatización del sistema, en los reportes se muestran datos como el área que cubre cada válvula, su elevación, tipo de válvula, caudal, presiones antes y después de la válvula, presión requerida en la válvula para

el funcionamiento de los goteros, presión mínima en los goteros, presión máxima en los goteros, caudal promedio en los goteros y su variación de flujo.

3.1.2 Parámetros de trabajo del sistema automatizado de riego por goteo

3.1.2.1 Desnivel

Para el cálculo de desnivel entre las válvulas y los RTU, se utilizó la elevación de las válvulas generadas en el diseño hidráulico. Se utilizó la altura de la ubicación de cada una de las válvulas y de la antena de control seleccionada para posteriormente determinar el valor de desnivel para cada uno de los procedimientos.

Con este valor se determina el diferencial de presión que debe de superar la señal hidráulica e identifican los puntos en donde se deben de colocar ecualizadores topográficos o resortes de compensación topográfica. Para ello se utiliza la ecuación 1 de la sección 2.3.4 del marco teórico.

3.1.2.2 Presión restante

Con tal de verificar si se cuenta con la presión de trabajo suficiente en el puerto presión del relé hidráulico, se utilizaron las presiones de trabajo disponibles de cada una de las válvulas generadas en el diseño hidráulico. Para la comprobación, se calculó si la presión de trabajo disponible seleccionada, supera al menos el 70 % de la presión aguas arriba de la válvula por automatizar sumado al diferencial de presión causado por el desnivel tal y como se indica en la sección 2.3.4 de marco teórico y calculado en el paso anterior (3.1.2.1).

3.1.2.3 Distancias

Considerando la sección 2.3.4 del marco teórico, se determinó la distancia entre el RTU y la válvula de control como uno de los principales factores que afectan el diseño, ya que impacta directamente el tiempo de apertura y cierre de válvulas. Para su verificación, se utilizó la información presente en el plano de diseño hidráulico que contiene la distribución de las válvulas en la finca. Al seleccionar una ubicación de las RTU, si la distancia de separación es mayor a 500 m el enlace probado queda descartado, para lo cual, se identificó el radio de trabajo que posee cada RTU en esa ubicación en específico.

3.1.2.4 Comunicación

El último factor por considerar, únicamente para el procedimiento nuevo propuesto, y que en este proyecto final de graduación incorpora con anticipación en los cálculos, es la capacidad de comunicación entre antenas de radio. Tal y como se menciona en la sección 2.3.4, las señales de radio se pueden ver interrumpidas por la topografía del terreno. Se verificó en Qgis utilizando el complemento de análisis de intervisibilidad si existe o no una línea de vista entre las antenas de los dispositivos RTU y la antena del NMC antes de que vayan a ser instaladas. Para lograrlo, se utilizó un modelo de elevación digital de la finca, el plano de la finca y las alturas de las antenas del NMC y RTU.

3.2 Utilización del procedimiento actual de La Empresa

Para el cumplimiento del segundo objetivo específico del presente trabajo final de graduación, se realizará el diseño del sistema de riego siguiendo el procedimiento que se utiliza actualmente en La Empresa, con el fin de realizar la comparación con el procedimiento propuesto.

El procedimiento utilizado por La Empresa tiene como base cálculos de prueba y error, en donde el diseñador elige la ubicación de los RTU de manera empírica, colocándoles en donde existan grupos de válvulas y seleccionando una válvula al azar dentro de ese conjunto como la válvula que proporciona la presión en el tubo de PE. Cuando las RTU están ubicadas en un plano sobre el diseño hidráulico, se procede a verificar si la presión en la tubería de PE es la suficiente para poder conmutar el relé hidráulico; cada válvula posee una presión variable que depende de su ubicación en la finca. Si la presión generada es suficiente en todos los relés, esa propuesta es aprobada sin tomar en consideración otras ubicaciones para los RTU.

3.2.1 Datos de entrada necesarios para el procedimiento actual

Una vez se ha descrito la finca (según sección 3.1.1), detallado el diseño agronómico e hidráulico y definidos los parámetros necesarios para la automatización (sección 3.1.2), se tiene la información suficiente para realizar el diseño de automatización utilizando la metodología de La Empresa. Para este procedimiento se requiere la elevación de cada una de las válvulas que van a automatizar; adicionalmente se necesita conocer la presión aguas arriba de cada válvula (punto P1 ilustración 4, sección 2.2.1), así como su ubicación en el plano de la finca. Estos parámetros de entrada se obtienen del diseño de riego hidráulico (apéndice B) elaborado previamente con el programa informático Irricad versión 17 del año 2018.

3.2.2 Descripción del procedimiento de diseño actual de La Empresa

El procedimiento de diseño de La Empresa se ha desarrollado como una herramienta en una plantilla Microsoft Office Excel en combinación con el programa informático de diseño asistido por ordenador AutoCAD 2020.

Los datos de elevación y presión de las válvulas son necesarios para calcular la presión en el relé hidráulico (presión suministrada por la tubería de PE), el cálculo se hace para verificar si la presión en el microtubo es la suficiente para que la válvula hidráulica sea capaz abrir una vez se proporciona la señal hidráulica de activación, ese valor de presión se puede calcular mediante la ecuación 2.

$$p_{res} = p_{RTU} - \Delta h - (p_2 \cdot 70\%) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

- p_{res} : Presión restante después de conmutar (mca)
- p_{RTU} : Presión aguas arriba de la válvula en donde se ubica el RTU (mca)
- Δh : Diferencia de elevación entre el RTU y la válvula a automatizar (m)
- P_2 : Presión aguas arriba de la válvula a automatizar (mca)

La presión de la tubería de PE es igual a la presión aguas arriba de la válvula en donde se ubica el RTU, ubicación que es elegida empíricamente por el diseñador, el cual se basa en probar distintas ubicaciones para los RTU hasta dar con una combinación de ubicaciones que mejor se adapte al sistema según el criterio del diseñador.

La ecuación 2 verifica si la presión en el microtubo de PE es mayor al 70 % de la presión aguas arriba de la válvula a automatizar más la diferencia de nivel entre los dos puntos. Si el valor de la presión restante es positivo significa que el relevador hidráulico puede conmutar.

Se verificó el desnivel entre los dos puntos de interés, si el valor es positivo significa que la pendiente es positiva (sube en dirección RTU-válvula), si el valor es negativo significa que la pendiente es negativa (baja en dirección RTU-válvula).

La ecuación 2 y el cálculo de diferencia de altura se utilizarán para verificar si la ubicación que se eligió de manera empírica para un RTU es viable o no, además de identificar donde es indispensable la instalación de válvulas TED.

Por último, conocer la distancia de separación entre el RTU y la válvula es importante. Por lo que se utilizará el programa informático AutoCAD para calcular la ruta siguiendo la trayectoria de la tubería principal, esta información se utiliza para conocer la cantidad de rollos de tubos de PE necesarios y verificar el funcionamiento del sistema.

Si la longitud de separación es mayor a 500 m, se tomará la decisión de cambiar el RTU de ubicación o automatizar la válvula con un RTU distinto. Esto se hace hasta que cada una de las válvulas esté emparejada a un RTU del sistema de radiocontrol.

En la ilustración 14 se muestra un diagrama del proceso iterativo que explica como se selecciona la ubicación o la cantidad de unidades terminales remotas necesarias para llevar a cabo el diseño, nótese como el resultado depende de la decisión que tome el diseñador.

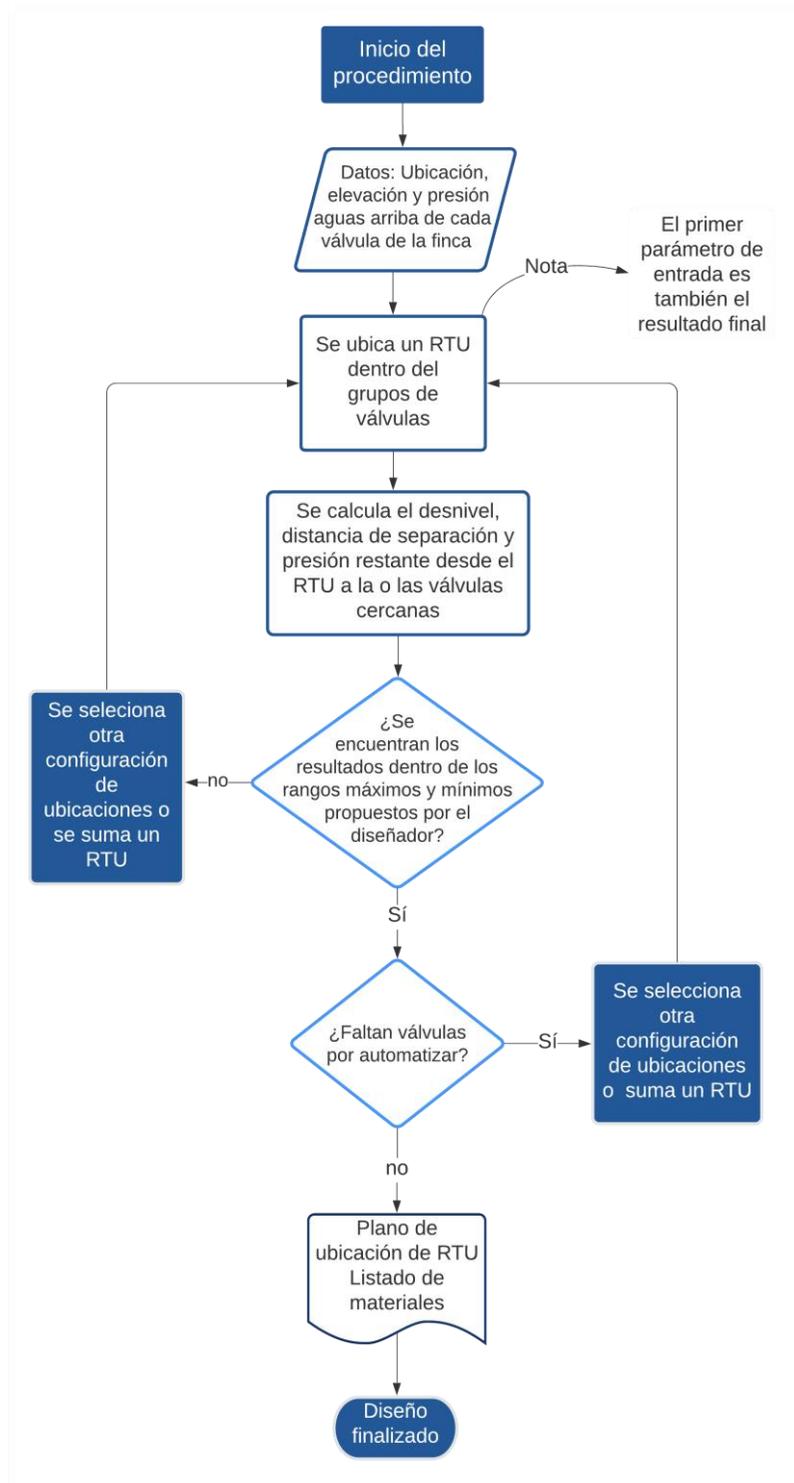


Ilustración 14. Diagrama de procedimiento actual utilizado por La Empresa.

3.3 Procedimiento propuesto para el diseño de la automatización

Para el tercer objetivo específico, el nuevo procedimiento de diseño propuesto requiere de información previa, según las secciones 3.1.1 y 3.1.2. La automatización se realizará para disminuir la cantidad y simplificar la ubicación de los RTU. El procedimiento propuesto incluye la totalidad de las posibles combinaciones de RTU y válvulas, con la meta de optimizar el diseño al reducir la cantidad de antenas y considerando potenciales interferencias de las señales de radio.

El procedimiento propuesto en este trabajo se basa completamente en criterios numéricos y lógicos, por lo que se deja de lado la toma de decisiones que debe de hacer el diseñador. Sin embargo, para el análisis de los escenarios finales, es requerido que el usuario tenga la experiencia ingenieril de verificar que la información obtenida sea lógica y correcta, además de suministrar los valores de entrada según el caso de aplicación. Adicionalmente, el usuario debe comprender el funcionamiento de los procesos metodológicos en caso de que se deban de realizar modificaciones debido a alteraciones en la red de riego y pueda ser capaz de respaldar cambios en el diseño de automatización con la información que se obtuvo una vez aplicado el método.

3.3.1 Preparación de datos de entrada

Igual que en el procedimiento actual de La Empresa (sección 3.2), el procedimiento propuesto requiere los datos de elevación y presión aguas arriba de cada una de las válvulas por automatizar (Apéndice B).

Adicionalmente, es necesario un archivo tipo CAD con polígonos que indiquen el área de la finca, líneas que señalen la tubería principal y puntos que marquen las válvulas hidráulicas (Ilustración 25, Apéndice B). Es necesario que toda la información se encuentre georreferenciada en un sistema de coordenadas correspondiente al de la finca en donde se

realizará el diseño. Con el objetivo de cargar la información en el software Qgis 3, se utiliza el convertidor Global Mapper para transformar el archivo DWG en uno tipo *shapefile*.

Se debe de contar también con un modelo de elevación o curvas de nivel que representen la topografía de la totalidad de finca, en el apartado 2.4 se mencionan los métodos comúnmente utilizados y las diferencias entre ellos. Sin importar el medio y el formato, la información debe de ser transformada a una capa tipo ráster o DEM para que pueda ser utilizada en el análisis de visibilidad. En la tabla 2 se muestra un resumen de las capas utilizadas en el programa informático Qgis.

Tabla 2. Capas utilizadas en Qgis.

Nombre	Tipo	SRC	Fecha	Resolución
<i>Área de la finca</i>	Polígonos	EPSG: 4326 WGS - 84	11/09/2019	N.A
<i>Tubería principal</i>	Líneas	EPSG: 32616 WGS – 84 / UTM zona 16 N	11/09/2019	N.A
<i>Válvulas</i>	Puntos	EPSG: 4326 WGS - 84	11/09/2019	N.A
<i>AP 26477 FBS F0210 RT1</i>	Ráster	EPSG: 32616 WGS – 84 / UTM zona 16 N	25/04/2015	12.5 , -12.5

Nota: N.A: No Aplica

Fuente DEM: (ASF DAAC, 2011).

3.3.2 Descripción del procedimiento de diseño propuesto

El primer paso fue generar una matriz de información en donde se verificó el cumplimiento de los criterios de automatización por comando hidráulico mencionados en el apartado 3.1.2, los cuales se resumen en la expresión:

$$p_r \geq p_i \wedge \Delta h_i \leq \Delta h_r \leq \Delta h_l \wedge D_r \leq D_i \quad \text{Expresión 1}$$

Donde;

p_r : Presión restante real de trabajo (mca)

p_i : Presión restante mínima permitida por el diseñador (mca)

Δh_r : Diferencia de elevación real (m)

Δh_i : Diferencia de elevación mínima permitida por el diseñador (m)

Δh_l : Diferencia de elevación máxima permitida por el diseñador (m)

D_r : Distancia de separación real (m)

D_i : Distancia de separación máxima permitida por el diseñador (m)

El significado de la expresión es el siguiente: i) si la presión restante real es mayor o igual a la presión restante mínima permitida por el diseñador y ii) el desnivel real es mayor o igual al desnivel mínimo y a su vez menor o igual al desnivel máximo permitido por el diseñador y iii) la distancia real de separación es menor o igual a la distancia de separación permitida por el diseñador entonces, el enlace hidráulico entre el solenoide del RTU y la válvula a automatizar puede funcionar. Se toman como valores de comparación los presentados en la tabla 3.

Tabla 3. Valores de entrada propuestos para este proyecto.

Variable	Valor
Presión restante mínima	3 mca
Desnivel máximo positivo	10 m
Desnivel mínimo negativo	- 10 m
Distancia máxima de separación	500 m

Con tal de verificar la presión restante del sistema, se calculó la presión restante considerando que un RTU se va a instalar en cada una de las válvulas, con el objetivo de identificar todas las permutaciones posibles. Para ello se hace uso de la ecuación 2 y se realiza el cálculo para cada nodo de interés con tal de conocer el comportamiento de la presión en toda la red, esto genera la matriz cuadrada $P_{n \times n}$, la cual se muestra a continuación.

$$P_{res} = \begin{pmatrix} p_1 - \Delta h - (p_1 \cdot 0.7) & p_1 - \Delta h - (p_2 \cdot 0.7) & \cdots & p_1 - \Delta h - (p_n \cdot 0.7) \\ p_2 - \Delta h - (p_1 \cdot 0.7) & p_2 - \Delta h - (p_2 \cdot 0.7) & \cdots & p_2 - \Delta h - (p_n \cdot 0.7) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_N - \Delta h - (p_1 \cdot 0.7) & p_N - \Delta h - (p_2 \cdot 0.7) & \cdots & p_N - \Delta h - (p_n \cdot 0.7) \end{pmatrix}$$

Donde;

P_N : Presión aguas arriba de la válvula en donde se ubica el RTU (mca)

Δh : Diferencia de elevación entre la ubicación del RTU y la válvula a automatizar (m)

p_n : Presión aguas arriba de la válvula a automatizar (mca)

P_{res} : Presión restante (mca)

El valor de presión restante para cada nodo se obtuvo mediante la matriz P_{res} , que permite verificar si el valor obtenido es mayor o menor al mínimo propuesto por el diseñador.

Con un análisis similar al anterior, se verificó el desnivel entre los dos puntos de interés, la elevación de la válvula a automatizar y la elevación en donde se encuentra el RTU, igualmente se determinó preliminarmente la instalación de un RTU en cada una de las válvulas. La matriz cuadrada H describe el procedimiento, si el resultado de un valor individual de la matriz se sale del rango indicado por el diseñador, el enlace entre el RTU y la válvula hidráulica no funcionará. Esta matriz permite identificar también los enlaces en los cuales es necesaria la instalación de ecualizadores topográficos o resortes compensadores en el relé hidráulico.

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_1 - h_1 & h_2 - h_1 & \cdots & h_n - h_1 \\ h_1 - h_2 & h_2 - h_2 & \cdots & h_n - h_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_1 - h_N & h_2 - h_N & \cdots & h_n - h_N \end{pmatrix}$$

Donde;

h_n = Elevación de la válvula a automatizar (msnm)

h_N = Elevación del RTU (msnm)

Al desarrollar la matriz H , se simula la instalación de un RTU en la válvula 1 y se calcula la diferencia de altura con respecto a la válvula 1, 2, 3, ..., n. Seguido se hace lo mismo, pero se simula colocar un RTU en la válvula 2, luego con la válvula 3 y así sucesivamente hasta llegar a la válvula N.

Si la distancia que separa un RTU de la válvula que automatizará es menor a la distancia recomendada (Tabla 3) entonces el enlace hidráulico es factible. Debido a la cantidad de válvulas en campo, se utilizó el programa informático QGIS 3 y su complemento *QNEAT3* explicado en la sección 2.5.1 para obtener una tabla cuyos valores corresponden a la separación que existe entre cada uno de los nodos que se encuentran dentro de la capa de puntos, en este caso, las válvulas hidráulicas.

Una vez se completó la base de datos con la información de desnivel, presión restante y distancia de separación, se asignó un identificador a cada posible enlace con el objetivo de corroborar que se cumplan los 3 criterios de la expresión 1, se eliminaron los enlaces que no cumplen con dichos criterios y se generó una nueva tabla de información con los enlaces posibles en donde a cada RTU se le asigna un número de válvulas a las que es capaz de automatizar. Cada proyecto de riego posee una cantidad de válvulas diferente por lo que la cantidad de enlaces teóricos posibles varía de igual manera, esta cantidad se determinó con la potencia al cuadrado del número total de válvulas n^2 , este valor proviene de multiplicar la filas y columnas de las matrices cuadradas explicadas en los párrafos anteriores.

Con la nueva información se identificó la opción en donde es posible automatizar cada una de las válvulas mientras se utiliza el menor número de RTU posible. Para ejecutar este proceso de selección de manera rápida y eficaz, se diseñó un algoritmo recursivo que toma la decisión de manera instantánea, basándose en comparaciones lógicas, en donde almacena cada permutación hasta conseguir el resultado óptimo (el resultado que utiliza el menor número de antenas RTU posible). El algoritmo funciona de manera tal que genera una tabla en la cual se almacenan las posibles “rutas” de automatización para después comparar cada una de ellas entre sí.

Puede que el algoritmo derive en varios resultados (configuraciones distintas con la misma cantidad de RTU), se selecciona el resultado que utiliza la menor cantidad de tubería de PE, los *diseños restantes* se almacenan en caso de que el diseño seleccionado no cumpla con el parámetro de comunicación de antenas. Este algoritmo toma la decisión basándose principalmente en cinco criterios (Tabla 4), cada regla tiene explicación lógica en campo.

Tabla 4. Criterios de diseño del algoritmo de selección.

Criterio	Descripción
1	Cada una de las válvulas hidráulicas tiene que ser automatizada por algún RTU, un diseño que deje una válvula hidráulica sin automatizar no es aceptable.
2	Una vez una válvula hidráulica ha sido enlazada a un RTU, los enlaces que se generarían al instalar un RTU sobre ella quedan eliminados como candidatos (una válvula hidráulica no puede enlazarse a dos RTU).
3	Procesamiento de opciones factibles, en donde el algoritmo debe de almacenar y comparar todas las permutaciones posibles, para que una vez se llegue a un resultado, se tenga la certeza de que es el mejor entre todas las posibilidades.
4	Se limita la cantidad de válvulas hidráulicas que puede automatizar un solo RTU (9 en total), según se menciona en el apartado 2.1 dedicado a automatización. Esta regla es una limitante al diseño pues los cálculos pueden permitir que un RTU automatice más de nueve válvulas, sin embargo, se debe de respetar la capacidad máxima del equipo.
5	Cada válvula debe de aparecer una sola vez en la solución, con tal de evitar resultados erróneos o confusos.

Una vez finalizada la evaluación de los criterios con el algoritmo, se utilizó el programa informático Qgis 3 y se procedió a analizar la topografía del terreno para corroborar que no existan desniveles de tal magnitud que impidan la comunicación por radio. Se utilizó el plugin *Intervisibility analysis* de la sección 2.5.2 para esta tarea.

La ilustración 15 muestra el diagrama de procedimiento del método propuesto en el presente trabajo final de graduación. Por último, se realizó un listado de los materiales necesarios para llevar a cabo el diseño propuesto. En el despiece debe incluir la cantidad de rollos de PE necesarios, la cantidad de RTU y sus componentes (panel solar, antena, batería, tarjetas expandibles y kit a tierra), la cantidad de solenoides, válvulas TED, resortes compensadores, pilotos o relés hidráulicos, NMC, Host y licencia.

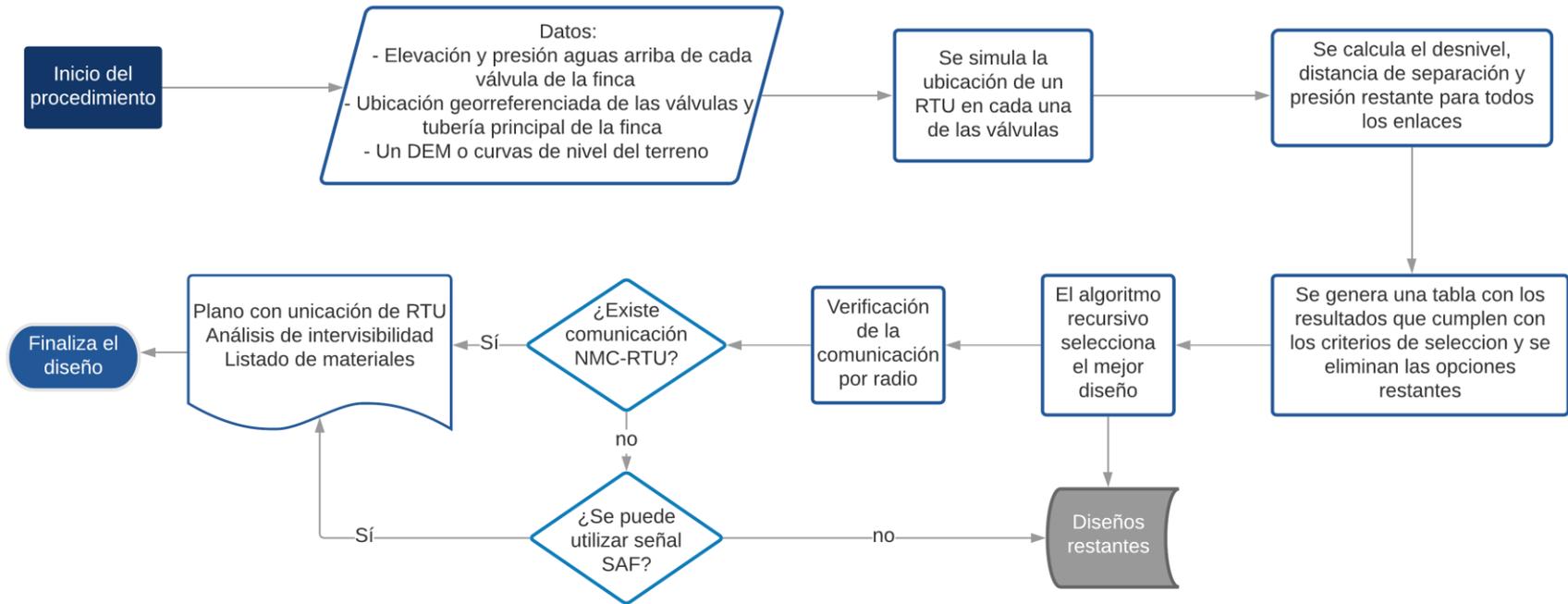


Ilustración 15. Diagrama del procedimiento propuesto

CAPITULO 4. RESULTADOS

4.1 Parámetros necesarios para la automatización del sistema de riego por goteo

Los parámetros necesarios para la automatización, requeridos según la sección 3.1.2 de la Metodología, se han considerado tomando como ejemplo la Finca de 284 Ha próxima a la zona sureste del lago Cocibolca (sección 3.1.1). Los parámetros generados en la siguiente sección son utilizados para el diseño según el procedimiento actual de La Empresa y el procedimiento propuesto en este trabajo final de graduación. En la sección 4.1.1 se presenta la información extraída de los reportes de proyecto presentes en el apéndice B necesarios para la aplicación de ambos procedimientos.

4.1.1 Caracterización del sistema hidráulico y finca

Del mapa tipo CAD del apéndice B se extrae la información relevante para este proyecto y se presenta en la ilustración 16. En esta figura se muestra la ubicación y distribución de la tubería principal y válvulas por automatizar, así como también la ubicación del cabezal de riego y los límites de los lotes.

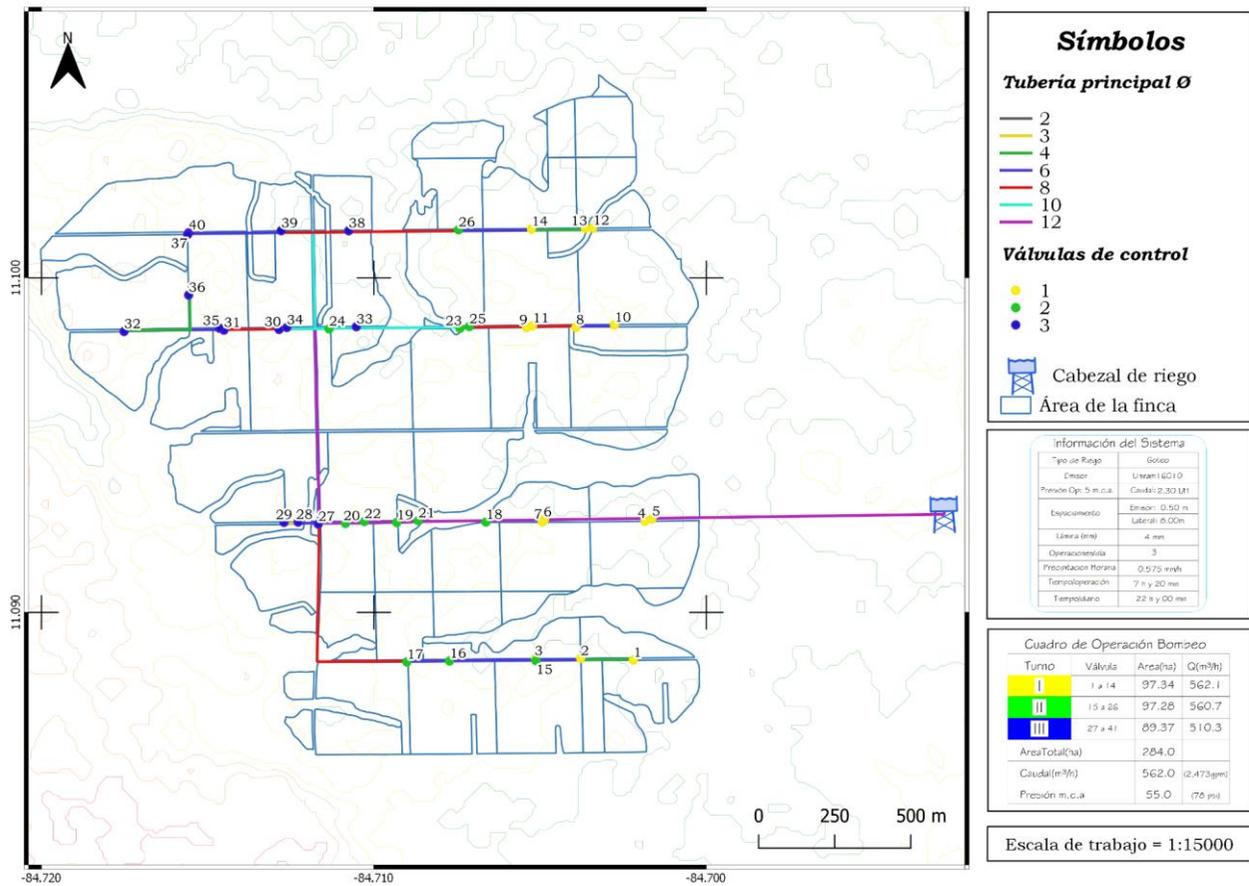


Ilustración 16. Sistema hidráulico de riego de la finca.

En total se automatizaron 40 válvulas hidráulicas utilizando comando hidráulico en combinación con señales de radio como módulo de control. De los reportes resultantes del diseño hidráulico del apéndice B, también se extrae la información relevante para el diseño de la automatización y se presentan en la tabla 5 (información solicitada en la sección 3.1.2 de la sección metodológica), incluyendo la elevación y presión aguas arriba de cada una de las 40 válvulas por automatizar.

Tabla 5. Caracterización de las válvulas hidráulicas de control.

<i>Turno</i>	<i>ID válvula</i>	<i>Diámetro de tubería (pulgadas)</i>	<i>Elevación (msnm)</i>	<i>Presión aguas arriba (mca)</i>
<i>1</i>	1	3	57.98	29.10
	2	2	60.34	29.50
	3	2	62.10	28.70
	4	3	57.31	45.80
	5	2	59.14	44.20
	6	2	57.59	42.90
	7	3	55.69	44.70
	8	4	64.18	23.80
	9	4	63.95	23.80
	10	3	64.17	22.00
	11	3	63.98	23.50
	12	2	58.54	26.90
	13	3	58.76	27.20
	14	3	61.04	28.30
<i>2</i>	15	3	62.38	24.90
	16	3	62.78	25.30
	17	3	63.17	26.20
	18	3	55.80	41.80
	19	3	60.27	34.80
	20	3	61.30	32.80

Continuación Tabla 5...

<i>Turno</i> ²	<i>ID válvula</i>	<i>Diámetro de tubería (pulgadas)</i>	<i>Elevación (msnm)</i>	<i>Presión aguas arriba (mca)</i>
2	21	3	60.63	35.00
	22	3	62.74	31.70
	23	4	59.39	33.00
	24	4	62.36	30.50
	25	4	60.68	31.70
	26	3	61.95	30.50
3	27	2	60.89	34.10
	28	3	61.25	33.30
	29	3	61.00	33.00
	30	2	63.98	27.20
	31	4	60.73	29.30
	32	4	59.65	27.80
	33	3	61.57	30.10
	34	2	63.63	27.60
	35	3	60.60	29.20
	36	2	62.99	24.30
	37	3	63.03	25.70
	38	2	58.50	32.60
	39	2	60.99	29.90
	40	2	62.95	25.90

² Riego basado en un reparto organizado del agua entre los bloques de la finca, consistente en que el agua está disponible y se suministra a un grupo de válvulas previamente programadas. 7 horas y 20 minutos por turno según la información del diseño hidráulico.

Se menciona también en la sección 3.1.2.3 la importancia de identificar la distancia de separación entre válvulas, esto con el objetivo de asegurar el funcionamiento del sistema y estimar la cantidad de microtubo de PE. Al extraer información del plano del apéndice B se presenta un esquema con la distribución de válvulas en la finca junto con la distancia que les separa siguiendo la trayectoria de la tubería principal (Ilustración 17).

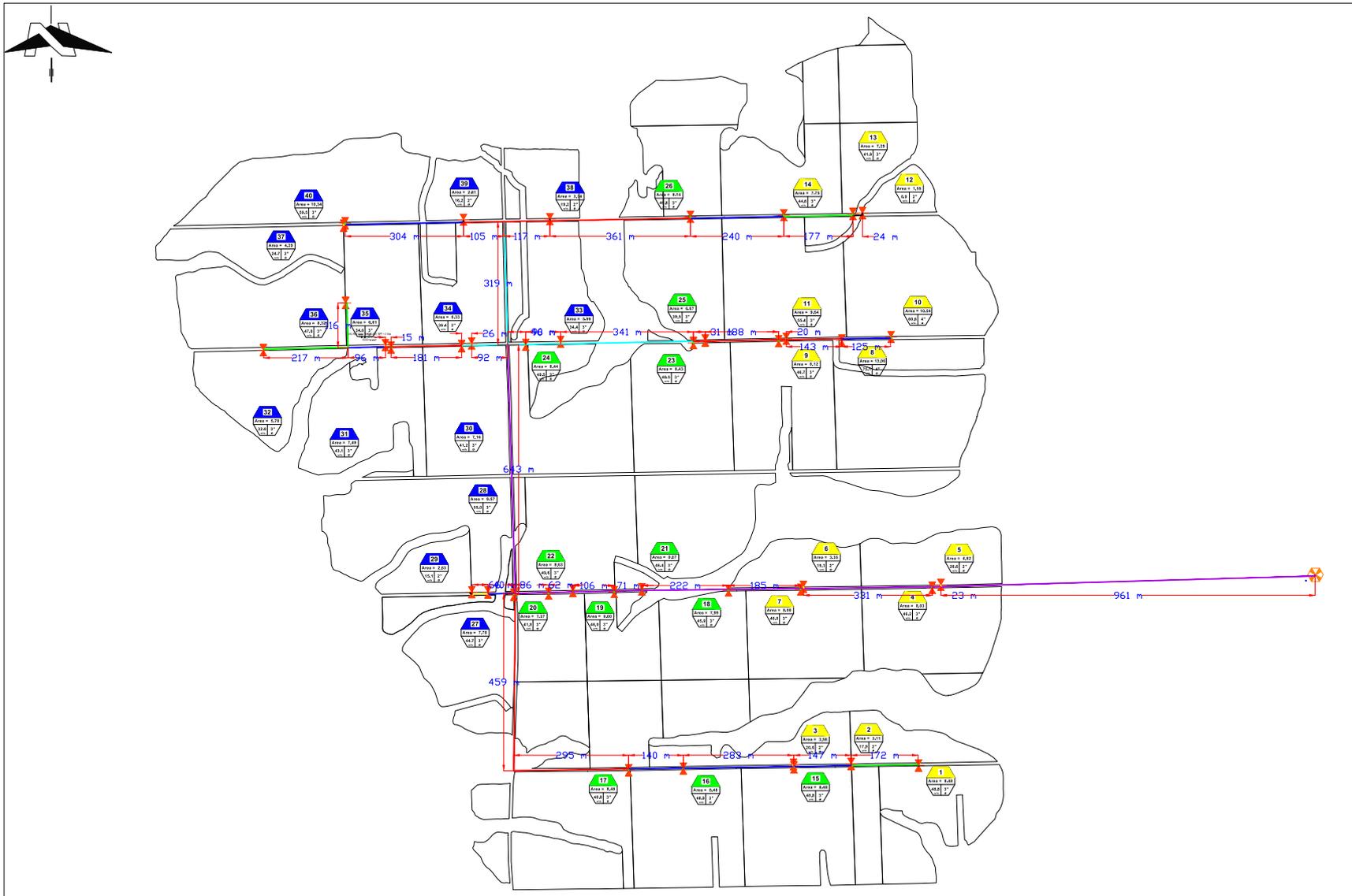


Ilustración 17. Longitudes de tubería principal.

Adicionalmente, en la ilustración 18 se presenta el DEM utilizado para la verificación de comunicación entre las antenas RTU. El modelo de elevación digital permite identificar las zonas altas y bajas del terreno que pueden provocar interferencia en la comunicación. Al verificar la línea de vista entre antenas, es importante tomar en consideración la altura de las antenas, no la elevación de la ubicación de estas.

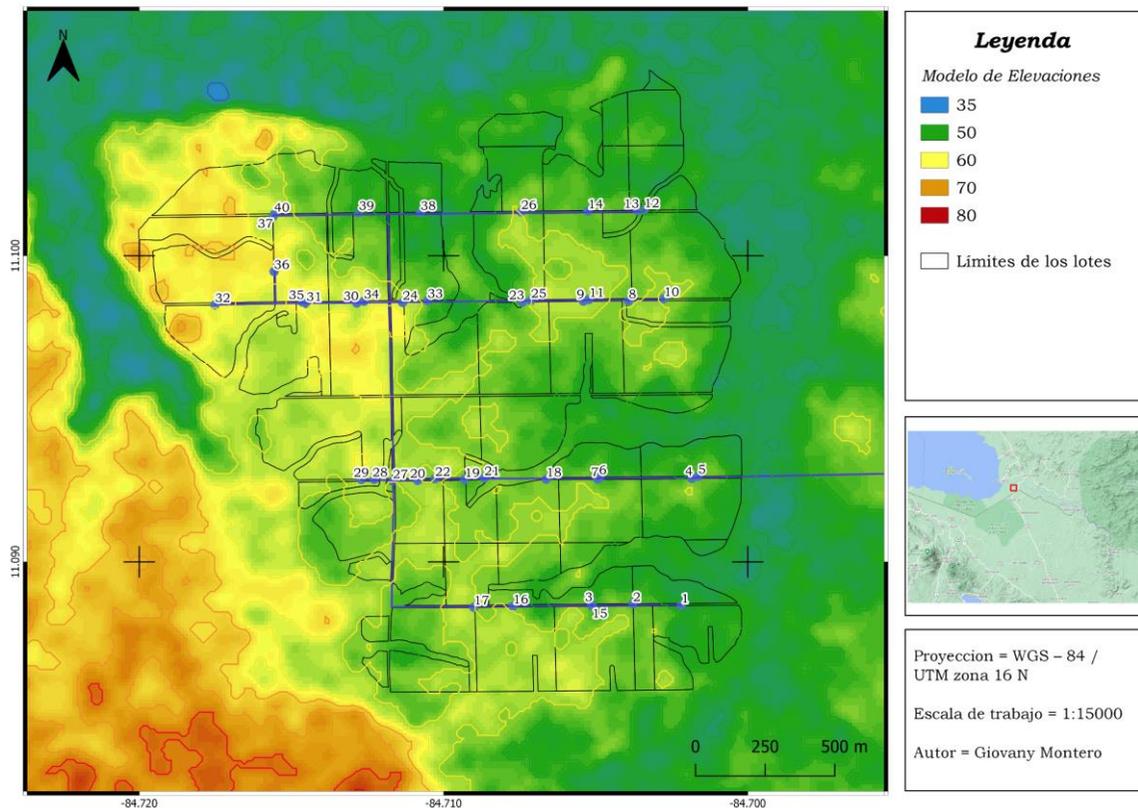


Ilustración 18. Modelo de elevación utilizado

Los resultados de desnivel, presión restante, distancia de separación y análisis de visibilidad serán presentados por separado en las siguientes secciones, esto pues los valores resultantes están directamente relacionados con la ubicación que se seleccione para los RTU, que a su vez está directamente relacionado al procedimiento de diseño seleccionado.

4.2 Resultados de la implementación del procedimiento actual utilizado por La Empresa

En la sección 4.1.1 se encuentran los datos utilizados para realizar los cálculos que se muestran a continuación. Según el diagrama de proceso de la sección metodológica (Ilustración 14), se selecciona la ubicación de cada RTU de acuerdo con los cálculos de presión, desnivel y distancia de separación, considerando los criterios de diseño. El criterio de selección para la ubicación de los RTU se basa en establecer grupos de válvulas para abarcar el mayor número de ellas (la ubicación de los RTU se hace una a la vez y que en un inicio no conoce el número total de RTU que va a necesitar para lograr la automatización).

Tomando esto en consideración, la tabla 6 muestra la ubicación seleccionada para cada RTU (según el criterio del autor de este documento). Esta tabla permite obtener los valores de presión de trabajo disponible y define uno de los puntos para calcular el desnivel y la distancia que le separa de la válvula por automatizar.

Tabla 6. Diseño de la automatización con el método original, ubicación de los RTU.

<i>Equipamiento</i>	<i>Número</i>	<i>Modelo</i>	<i>Ubicación</i>	<i>elevación msnm</i>	<i>Presión aguas arriba mca</i>
<i>RTU1</i>	1	Radionet 5	V1	57.98	29.10
<i>RTU2</i>	2	Radionet 3	V17	63.17	26.20
<i>RTU3</i>	3	Radionet 5	V7	55.69	44.70
<i>RTU4</i>	4	Radionet 7	V19	60.27	34.80
<i>RTU5</i>	5	Radionet 7	V23	59.39	33.00
<i>RTU6</i>	6	Radionet 5	V24	62.36	30.50
<i>RTU7</i>	7	Radionet 5	V35	60.6	29.20
<i>RTU8</i>	8	Radionet 5	V12	58.54	26.90
<i>RTU9</i>	9	Radionet 5	V38	58.5	32.60

Esta tabla surge de las ubicaciones consideradas por el diseñador y las columnas de *elevación* y *presión* provienen de las elevaciones y presiones de las válvulas que se encuentran en la ubicación seleccionada.

A manera de ejemplo, al colocar el RTU en la ubicación V1 (válvula 1) en el plano de riego de la finca (Ilustración 16), los atributos asignados a ese RTU van a ser iguales a la elevación y presión de la válvula 1: 57.98 msnm y 29.10 mca respectivamente.

En la tabla 7 se presentan los resultados de los valores de desnivel, distancia de separación y la presión restante entre cada RTU obtenidos según la tabla 6 para cada una de las válvulas por automatizar.

Tabla 7. Diseño de la automatización con el procedimiento actual; comprobación de presiones.

<i>Válvula</i>	<i>RTU asignado</i>	<i>Elevación msnm</i>	<i>P. aguas arriba mca</i>	<i>PE m</i>	<i>Desnivel m</i>	<i>TED</i>	<i>Pres. mca</i>
1	1	57.98	29.10	0	0.00	-	8.73
2	1	60.34	29.50	172	2.36	-	6.09
3	1	62.1	28.70	320	4.12	1	4.89
4	3	57.31	45.80	342	1.62	-	11.02
5	3	59.14	44.20	366	3.45	-	10.31
6	3	57.59	42.90	10	1.90	-	12.77
7	3	55.69	44.70	0	0.00	-	13.41
8	5	64.17	23.80	382	4.78	1	11.56
9	5	63.95	23.80	220	4.56	1	11.78
10	5	64.17	22.00	509	4.78	1	12.82
11	5	63.98	23.50	240	4.59	1	11.96
12	8	58.54	26.90	0	0.00	-	8.07
13	8	58.76	27.20	25	0.22	-	7.64
14	8	61.04	28.30	202	2.50	-	4.59
15	1	62.38	24.90	320	4.40	1	7.27
16	2	62.78	25.30	140	-0.39	-	8.88
17	2	63.17	26.20	0	0.00	-	7.86
18	3	55.8	41.80	185	0.11	-	15.33
19	4	60.27	34.80	0	0.00	-	10.44
20	4	61.3	32.80	168	1.03	-	10.81

Continuación tabla 7...

<i>Válvula</i>	<i>RTU asignado</i>	<i>Elevación msnm</i>	<i>P. aguas arriba mca</i>	<i>PE m</i>	<i>Desnivel m</i>	<i>TED</i>	<i>Pres. mca</i>
21	4	60.63	35.00	71	0.36	-	9.94
22	4	62.74	31.70	106	2.47	-	10.14
23	5	59.39	33.00	0	0.00	-	9.9
24	6	62.36	30.50	0	0.00	-	9.15
25	5	60.68	31.70	31	1.29	-	9.52
26	8	61.95	30.50	442	3.41	-	2.14
27	4	61.25	34.10	324	0.98	-	9.95
28	4	60.89	33.30	258	0.62	-	10.87
29	4	61	33.00	366	0.73	-	10.97
30	6	63.63	27.20	166	1.27	-	10.19
31	7	60.73	29.30	17	0.13	-	8.56
32	7	59.65	27.80	314	-0.95	-	10.69
33	6	61.57	30.10	90	-0.79	-	10.22
34	6	63.98	27.60	139	1.62	-	9.56
35	7	60.6	29.20	0	0.00	-	8.76
36	7	62.99	24.30	211	2.39	-	9.8
37	9	63.03	25.70	532	4.53	1	10.08
38	9	58.5	32.60	0	0.00	-	9.78
39	9	60.99	29.90	222	2.49	-	9.18
40	9	62.95	25.90	527	4.45	1	10.02

Nota: Pres: presión restante

A manera de ejemplo se describe el diseño de automatización para la válvula 1 en la tabla 7. Se decide simular la instalación del RTU 1 en la ubicación de la válvula 1 (Tabla 6). La válvula 1 posee una elevación de 57.98 msnm y una presión aguas arriba de la válvula es de 29.10 mca, por ende, su desnivel es igual a 0 m, la separación es de 0 m, no se utilizan válvulas TED y la presión restante es igual a 8.73 mca (la automatización es posible).

Si se realiza el mismo proceso, pero con la válvula 2 y se asigna igualmente al RTU 1, la elevación de la válvula 2 es de 60.34 msnm y la presión aguas arriba de la válvula 2 es de 29.50 mca, por ende, su desnivel es de 2.36 m, la cantidad de PE es 172 m y el valor de la presión restante es 6.09 mca, (la automatización es posible).

El objetivo de la tabla 7 es que todos y cada uno de los valores de la columna de presión restante sean positivos, pues solo así funcionaría la automatización, se deben de probar distintas combinaciones de ubicación y asignación de RTU por cada válvula.

El sistema actual se considera no optimizado debido a que busca generar un resultado de manera inmediata, sin antes tomar en consideración la totalidad de las opciones. El diseñador debe descubrir el comportamiento de la red hidráulica y su efecto en la automatización conforme se avanza en el diseño, probar varias opciones hasta encontrar una ruta viable, no obstante, puede no ser la óptima. Además, si se genera una matriz de datos de toda la red y su efecto en la automatización, se tendría la información suficiente para tomar la mejor decisión en términos de rendimiento y costos.

En la Ilustración 19 se resumen las tablas 6 y 7, la ilustración proporciona la ubicación en donde se deben instalar los RTU y su cuadro de operación. El plano es utilizado por los instaladores y se apoyan en él para preinstalar las antenas en campo y desde ahí, hacer llegar el tubo de PE a cada válvula, por eso se busca que el plano sea lo más representativo posible.

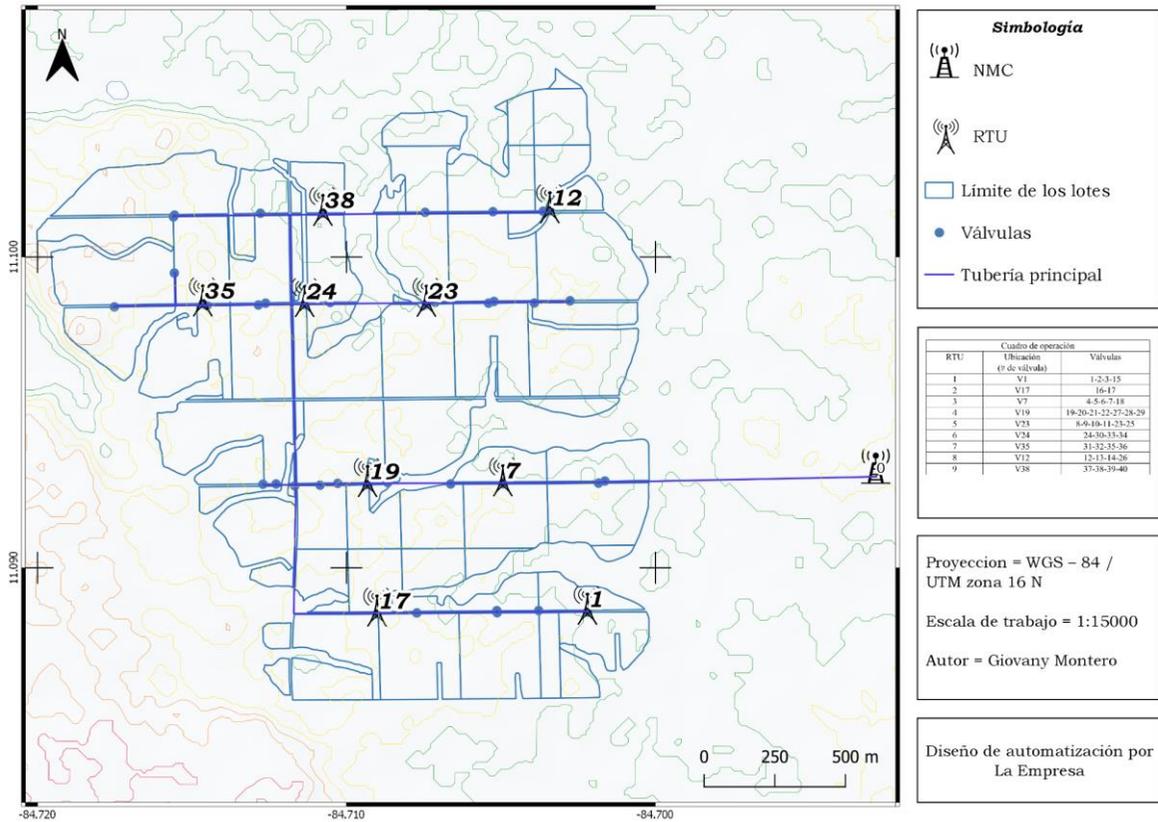


Ilustración 19. Proyecto de automatización de la finca.

El despiece resultante se muestra en la tabla 8, no son tomados en consideración repuestos, conectores o accesorios de PVC. Para el control de automatización utilizando la metodología de la empresa es necesaria una unidad anfitriona con sus respectivos accesorios, un controlador NMC y su licencia. En campo, son necesarias 9 RTU, 19 tarjetas de expansión para los RTU, 9 antenas para transmisión de señal, 9 paneles solares, 9 baterías, 8 ecualizadores topográficos TED, 40 relés hidráulicos, 8 rollos de PE 8 mm de 1000 metros, 40 válvulas solenoides y 9 kits para hacer la instalación a tierra.

Tabla 8. Listado de materiales utilizando la metodología de la empresa.

<i>Cantidad</i>	<i>Nombre</i>
1	R-NET Unidad anfitriona y accesorios
1	Controlador NMC-Pro + licencia
9	R-NET RTU Expandible
19	R-NET Tarjetas de expansión
9	R-NET Antenas para transmisión de señal 6 m
9	R-NET Kit para panel solar 9 V 3 W
9	R-NET Baterías 6 V 1.2 AH
8	Ecualizadores topográficos (TED)
40	Relés hidráulicos de 3 Vías
8	Tubo de PE de 8 mm 1000 m
40	Solenoides DC Aquative
9	Elementos necesarios para conexión a tierra

4.3 Resultados de la implementación del procedimiento propuesto

El procedimiento propuesto explicado en la sección 3.3.2, se utilizará para automatizar un proyecto de riego de la finca descrita en la sección 3.1.1. Esta implementación permite ejemplificar y verificar la aplicabilidad del procedimiento en condiciones reales; además permite comparar el resultado de dicha implementación con el resultado obtenido en la sección 4.2 (la implementación del procedimiento de La Empresa).

Una vez completado el procedimiento de la sección 4.1.1, se procede a utilizar los datos de elevación y presión aguas arriba mostrados en la tabla 5 con el objetivo de generar las dos matrices de datos descritas en la sección 3.3.2, las matrices P_{res} y H (tabla 9). Debido a la cantidad de datos generados, la tabla 9 expone únicamente el resultado de simular la instalación de un RTU en las válvulas 1 y 2. En la tabla 17 del anexo A se presentan los datos completos generados en esta sección.

Tabla 9. Verificación de presión y desnivel con procedimiento propuesto para antenas en válvula 1 y válvula 2.

Válvula	Antena en válvula 1			Antena en válvula 2		
	Desnivel (msnm)	Diferencia (mca)	Pres (mca)	Desnivel (msnm)	Diferencia (mca)	Pres (mca)
1	0	29,10	8,73	-2,36	25,73	11,49
2	2,36	32,87	6,09	0	29,50	8,85
3	4,12	34,59	4,89	1,76	31,21	7,65
4	-0,67	44,84	Es menor al límite	-3,03	41,47	Es menor al límite
5	1,16	45,86	Es menor al límite	-1,20	42,49	Es menor al límite
6	-0,39	42,34	Es menor al límite	-2,75	38,97	Es menor al límite
7	-2,29	41,43	Es menor al límite	-4,65	38,06	Es menor al límite
8	6,20	32,66	6,24	3,84	29,29	9,00
9	5,97	32,33	6,47	3,61	28,96	9,23
10	6,19	30,84	7,51	3,83	27,47	10,27
11	6,00	32,07	6,65	3,64	28,70	9,41
12	0,56	27,70	9,71	-1,80	24,33	12,47
13	0,78	28,31	9,28	-1,58	24,94	12,04
14	3,06	32,67	6,23	0,70	29,30	8,99
15	4,40	31,19	7,27	2,04	27,81	10,03
16	4,80	32,16	6,59	2,44	28,79	9,35
17	5,19	33,61	5,57	2,83	30,24	8,33
18	-2,18	38,69	Es menor al límite	-4,54	35,31	4,78
19	2,29	38,07	Es menor al límite	-0,07	34,70	5,21
20	3,32	37,54	Es menor al límite	0,96	34,17	5,58

Continuación Tabla 9...

Válvula	Antena en válvula 1			Antena en válvula 2		
	Desnivel (msnm)	Diferencia (mca)	Pres (mca)	Desnivel (msnm)	Diferencia (mca)	Pres (mca)
21	2,65	38,79	Es menor al límite	0,29	35,41	4,71
22	4,76	38,50	Es menor al límite	2,40	35,13	4,91
23	1,41	35,01	4,59	-0,95	31,64	7,35
24	4,38	36,76	3,37	2,02	33,39	6,13
25	2,70	35,56	4,21	0,34	32,19	6,97
26	3,97	36,17	3,78	1,61	32,80	6,54
27	2,91	38,26	Es menor al límite	0,55	34,89	5,08
28	3,27	37,97	Es menor al límite	0,91	34,60	5,28
29	3,02	37,31	Es menor al límite	0,66	33,94	5,74
30	6,00	35,77	4,06	3,64	32,40	6,82
31	2,75	33,23	5,84	0,39	29,86	8,6
32	1,67	30,19	7,97	-0,69	26,81	10,73
33	3,59	35,23	4,44	1,23	31,86	7,2
34	5,65	35,67	4,13	3,29	32,30	6,89
35	2,62	32,94	6,04	0,26	29,57	8,8
36	5,01	31,46	7,08	2,65	28,09	9,84
37	5,05	32,91	6,06	2,69	29,54	8,82
38	0,52	33,34	5,76	-1,84	29,97	8,52
39	3,01	34,20	5,16	0,65	30,83	7,92
40	4,97	33,00	6,00	2,61	29,63	8,76

Nota: Desnivel corresponde a Matriz H, Pres corresponde a matriz Pres.

Cuando uno de los valores de presión restante de la tabla 9 es menor al indicado en la tabla 3, queda eliminado como candidato a la automatización. Por ejemplo, al colocar un RTU en la válvula 2, no es posible conmutar el relé hidráulico de las válvulas 4, 5, 6 y 7 pues la presión restante calculada no es mayor o igual a 3 mca. La explicación es que las cotas de elevación para esas 4 válvulas son tan altas, que no es posible generar una presión de comando suficiente como para poder activar la señal hidráulica de apertura.

Tal y como se indica en la sección 3.3.2, el siguiente paso consiste en identificar la distancia de separación que existe entre los integrantes que conforman las matrices P_{res} y H . Para ello, se carga la información georreferenciada de la ilustración 17 al programa Qgis 3 y se ejecuta el complemento *QNEAT3*, del cual se obtiene como resultado su tabla de atributos, más específicamente las columnas *Origin_id*, *Destination_id* y *Total_cost*. En la tabla 18 del anexo B se encuentran la totalidad de datos generados al aplicar el complemento.

En Qgis, visualmente se genera una capa de líneas (Ilustración 20) que simboliza el enlace de cada una de las válvulas entre sí (sección 2.5.1), aunque en la ilustración los enlaces se muestran en línea recta, esto no es así, pues estos siguen la trayectoria de la tubería principal. A cada línea se le asigna un valor (*total_cost*) de longitud que separa sus dos nodos (*Origin_id* y *Destination_id*). Cada color representa un nodo o válvula hidráulica, esto no es una limitante pues el resultado aprovechable se encuentra en formato de tabla.

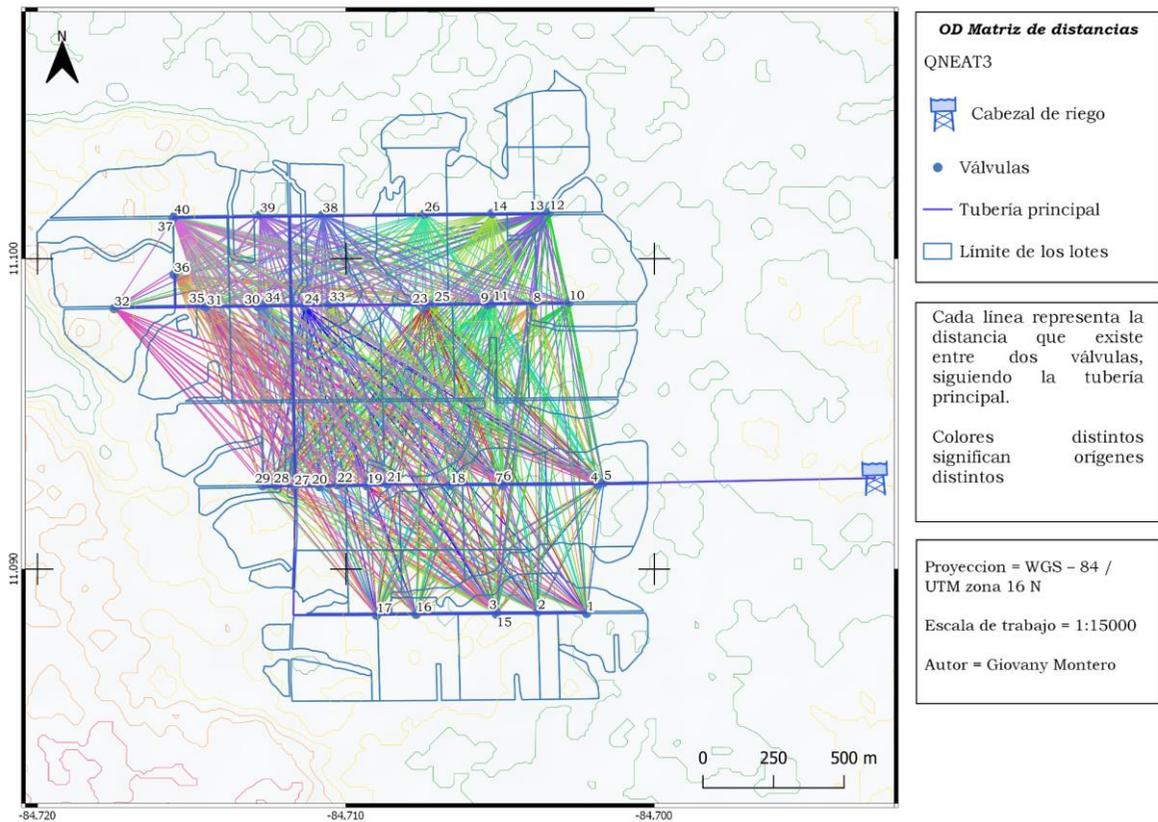


Ilustración 20. Resultados del plugin QNEAT3.

Una vez se obtienen los resultados de desnivel, presión restante y distancia de separación, se procede a verificar los enlaces que cumplen con los criterios de diseño de la sección 3.3.2. El o los enlaces que no cumplan con cada uno de los criterios son eliminados, los restantes obtenidos se presentan en la tabla 10. Este procedimiento genera 1600 posibles enlaces o 40^2 enlaces (correspondiente a 40 válvulas), cada enlace con 3 criterios de selección (4800 datos). De esos 1600 enlaces, 1358 no cumplen con los criterios de selección de la expresión 1, por lo que en la tabla 10 solo se muestran los 242 enlaces que sí cumplen con los criterios de selección.

Por ejemplo, al colocar la antena RTU en la ubicación de la válvula 1, esta es capaz de conmutar el relé de las válvulas 1, 2, 3 y 15.

Debido a la gran cantidad de información es necesario el uso de algún programa informático que permita realizar dicho análisis de manera rápida y ordenada, en este caso se decide utilizar Excel.

Tabla 10. Enlaces que cumplen con los tres parámetros definidos por el usuario.

<i>Antena en</i>	<i>Válvulas</i>																																						
1	1	2	3									15																											
2	1	2	3									15	16																										
3	1	2	3									15	16	17																									
4				4	5	6	7																																
5				4	5	6	7																																
6				4	5	6	7					18	19	21																									
7				4	5	6	7					18	19	21																									
8								8	9	10	11			23	25																								
9								8	9	10	11			23	25																								
10								8	9	10	11				25																								
11								8	9	10	11			23	25																								
12												12	13	14																									
13												12	13	14																									
14												12	13	14																									
15	1	2	3												26																								
16		2	3												15	16	17																						
17			3												15	16	17																						
18				6	7										18	19	20	21	22																				
19				6	7										18	19	20	21	22																				
20															18	19	20	21	22																				
21				6	7										18	19	20	21	22																				
22															18	19	20	21	22																				
23								8	9		11				23	24	25			33																			
24															23	24	25			30	31	33	34	35	38	39													
25								8	9	10	11				23	24	25					33																	
26												12	13	14								26				38													
27															19	20	21	22								27	28	29											
28															19	20	21	22										27	28	29									
29															19	20	21	22											27	28	29								
30																						24								30	31	33	34	35	36				
31																						24									30	31	32	33	34	35	36		
32																																31	32		35	36			
33																						23	24	25							30	31	33	34	35				
34																						24										30	31	33	34	35	36		
35																						24										30	31	32	33	34	35	36	
36																																30	31	32		34	35	36	
37																																				37		39	40
38																						24		26											37	38	39	40	
39																						24													37	38	39	40	
40																																				37		39	40

La tabla 10 se exportó a la aplicación que contiene el algoritmo de selección (sección 3.3.2 de la metodología) y este procede a iniciar una rutina de categorización de valores, la cual le permite manipular los datos de manera tal que le permite llegar al resultado deseado (ilustración 21). Se utilizó Delphi como entorno de desarrollo de software para la creación de la aplicación, el cual utiliza como lenguaje de programación Object Pascal.

No	Min	Max	Total	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	1	1	15	4	1	2	3											15								
2	1	1	16	5	1	2	3											15	16							
3	1	1	17	6	1	2	3											15	16	17						
4	4	4	7	4				4	5	6	7															
6	4	4	21	7				4	5	6	7											18	19		21	
8	8	8	25	6								8	9	10	11											23
10	8	8	25	5								8	9	10	11											
12	12	12	14	3											12	13	14									
14	12	12	26	4											12	13	14									
16	2	17	5															15	16	17						
17	3	17	4			2	3											15	16	17						
18	6	22	7																			18	19	20	21	22
19	6	29	10							6	7											18	19	20	21	22
20	18	29	8																			18	19	20	21	22
23	8	33	7									8	9		11											23
24	23	39	10																							23
25	8	33	8									8	9	10	11											23
26	12	38	5													12	13	14								
27	19	29	7																			19	20	21	22	
30	24	36	7																							
31	24	36	8																							
32	31	36	4																							
33	23	35	8																							23
36	30	36	6																							
37	37	40	3																							
38	24	39	4																							
39	24	40	5																							

Ilustración 21. Ingreso de la base de datos al algoritmo.

El algoritmo tiene un comportamiento recursivo, es decir, puede repetirse o aplicarse indefinidamente de manera autónoma hasta llegar a un resultado con características predefinidas. Al dar inicio el análisis, el algoritmo traza todas las rutas que le permitan llegar a una automatización total de todas las válvulas, los datos se recorren indefinidamente en una serie de iteraciones (las cuales se almacenan dentro de la aplicación) hasta llegar a 3 posibles resultados o “estados” de trazado: *parcial*, *colisión* o *completado* (Ilustración 22).

No	Estatus	Total	Grupos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	Parcial	1	3		3	3	3												3	3	3
2	Parcial	2	3,6		3	3	3	6	6	6	6								3	3	3
3	Parcial	3	3,6,25		3	3	3	6	6	6	6	25	25	25	25				3	3	3
4	Parcial	4	3,6,25,26		3	3	3	6	6	6	6	25	25	25	25	26	26	26	3	3	3
5	Colisión	5	3,6,25,26,19		3	3	3	6	6	6	6	25	25	25	25	26	26	26	3	3	3
6	Colisión	6	3,6,25,26,20		3	3	3	6	6	6	6	25	25	25	25	26	26	26	3	3	3
7	Colisión	7	3,6,25,26,18		3	3	3	6	6	6	6	25	25	25	25	26	26	26	3	3	3
8	Colisión	8	3,6,25,26,27		3	3	3	6	6	6	6	25	25	25	25	26	26	26	3	3	3
9	Parcial	4	3,6,25,14		3	3	3	6	6	6	6	25	25	25	25	14	14	14	3	3	3
10	Colisión	5	3,6,25,14,19		3	3	3	6	6	6	6	25	25	25	25	14	14	14	3	3	3
11	Colisión	5	3,6,25,14,20		3	3	3	6	6	6	6	25	25	25	25	14	14	14	3	3	3
12	Colisión	5	3,6,25,14,18		3	3	3	6	6	6	6	25	25	25	25	14	14	14	3	3	3
13	Colisión	5	3,6,25,14,27		3	3	3	6	6	6	6	25	25	25	25	14	14	14	3	3	3
14	Parcial	4	3,6,25,12		3	3	3	6	6	6	6	25	25	25	25	12	12	12	3	3	3
15	Colisión	5	3,6,25,12,19		3	3	3	6	6	6	6	25	25	25	25	12	12	12	3	3	3
16	Colisión	5	3,6,25,12,20		3	3	3	6	6	6	6	25	25	25	25	12	12	12	3	3	3
17	Colisión	5	3,6,25,12,18		3	3	3	6	6	6	6	25	25	25	25	12	12	12	3	3	3
18	Colisión	5	3,6,25,12,27		3	3	3	6	6	6	6	25	25	25	25	12	12	12	3	3	3
19	Parcial	3	3,6,23		3	3	3	6	6	6	6	23	23	23				3	3	3	
20	Colisión	4	3,6,23,25		3	3	3	6	6	6	6	23	23	23				3	3	3	
21	Colisión	4	3,6,23,8		3	3	3	6	6	6	6	23	23	23				3	3	3	
22	Colisión	4	3,6,23,10		3	3	3	6	6	6	6	23	23	23				3	3	3	
23	Parcial	3	3,6,8		3	3	3	6	6	6	6	8	8	8				3	3	3	
24	Parcial	4	3,6,8,26		3	3	3	6	6	6	6	8	8	8	8	26	26	26	3	3	3
25	Colisión	5	3,6,8,26,19		3	3	3	6	6	6	6	8	8	8	8	26	26	26	3	3	3
26	Colisión	5	3,6,8,26,20		3	3	3	6	6	6	6	8	8	8	8	26	26	26	3	3	3
27	Colisión	5	3,6,8,26,18		3	3	3	6	6	6	6	8	8	8	8	26	26	26	3	3	3
28	Colisión	5	3,6,8,26,27		3	3	3	6	6	6	6	8	8	8	8	26	26	26	3	3	3
29	Parcial	4	3,6,8,14		3	3	3	6	6	6	6	8	8	8	8	14	14	14	3	3	3

Ilustración 22. Trazado de rutas del algoritmo mediante iteraciones.

Parcial es un estado intermedio y es el principal encargado de trazar la ruta de automatización. Este resultado se obtiene cada vez que se selecciona una ubicación que permite automatizar un grupo de válvulas y además da paso para seleccionar una ubicación nueva, sigue el criterio 1 de la tabla 4.

El estado *colisión* surge después de seleccionar una ubicación cuyos valores de automatización colisionan con los valores de la selección anterior, es decir, verifican el criterio 2 de la tabla 4.

Por último, el estado *completado* verifica el criterio 3 de la tabla 4, que corresponde al escenario en donde todas las válvulas son automatizadas desde alguna ubicación. En este punto el algoritmo almacena esta información y procede a trazar una nueva ruta distinta a la anterior.

Cuando no existen más rutas por trazar, el algoritmo inicia una comparación de resultados en donde selecciona el resultado que posee el menor número de ubicaciones o grupos, este resultado asegura la menor cantidad de antenas RTU. El algoritmo puede generar distintos resultados que poseen la misma cantidad de grupos, es decisión del diseñador cual utilizar (Iteración 66 y 105, Ilustración 23).

No	Total	Grupos
66		7 3,4,25,26,20,36,37
105		7 3,4,8,26,20,31,37

Ilustración 23. Resultado del análisis, las iteraciones 66 y 105.

Después de finalizar el proceso iterativo (408 iteraciones para este proyecto de riego con las condiciones especificadas) se selecciona la combinación adecuada (automatización total de válvulas con la menor cantidad de grupos) de la ilustración 22 (iteración 105) y se presenta como resultado en un cuadro de operación (Tabla 11). El resultado asegura que con 7 RTU el arreglo es el óptimo para las condiciones de presión, desnivel y distancias de separación definidas en la tabla 3. Se selecciona la iteración 105 pues ofrece el mismo resultado mientras se utiliza una menor cantidad de tubería de PE. Se utiliza el resultado obtenido con el complemento de QNEAT 3 en Qgis para definir la cantidad de micro tubo necesario.

Tabla 11. Cuadro de operación, resultado del algoritmo de selección.

<i>Mejor ubicación del RTU</i>	<i>Válvulas que puede automatizar</i>
3	1-2-3-15-16-17
4	4-5-6-7
8	8-9-10-11-23-25
26	12-13-14-26-38
20	18-19-20-21-22-27-28-29
31	24-30-31-32-33-34-35-36
37	37-39-40

Por ejemplo, según la tabla 10, para el grupo de válvulas 1, 2, 3, 15, 16 y 17, la mejor opción en donde colocar un RTU es al lado de la válvula 3, pues es ahí en donde se genera una presión suficiente para impulsar la señal hidráulica, la diferencia de altura desde la posición de la válvula 3 hacia todas las válvulas es menor a 10 m y como la válvula 3 se encuentra en el centro del grupo de válvulas, los 500 m hacia la derecha e izquierda son suficientes para abarcar a todo el grupo.

Por último, una vez seleccionadas las ubicaciones de cada RTU en el plano según tabla 11, se crea una nueva capa de puntos en el proyecto del programa informático Qgis con la ubicación del NMC y cada RTU propuesto. Al cargar la información en el plugin *Visibility analysis*, asignar una altura³ al NMC de 9 m y una altura a los RTU de 4 m, se concluye que es posible generar una señal de radio que parta desde el NMC y sea capaz de llegar, sin interrupciones, a los 7 RTU instalados en campo (Ilustración 24).

Al realizar un *Viewshed analysis* en Qgis, se logra observar que efectivamente ninguna antena queda por fuera de la línea de vista del NMC, en la ilustración 24 las zonas de color morado indican que no pueden ser observadas desde el NMC. El DEM utilizado registra 0,0156 Ha/Píxel o 12,5 m lineales por píxel; los 7 RTU se distribuyen en 284 Ha por lo que la resolución del DEM es suficiente al menos para identificar elevaciones en el terreno que puedan interferir con la señal de radio.

³ Dimensiones seleccionadas según el manual de instalación del equipo RadioNet.

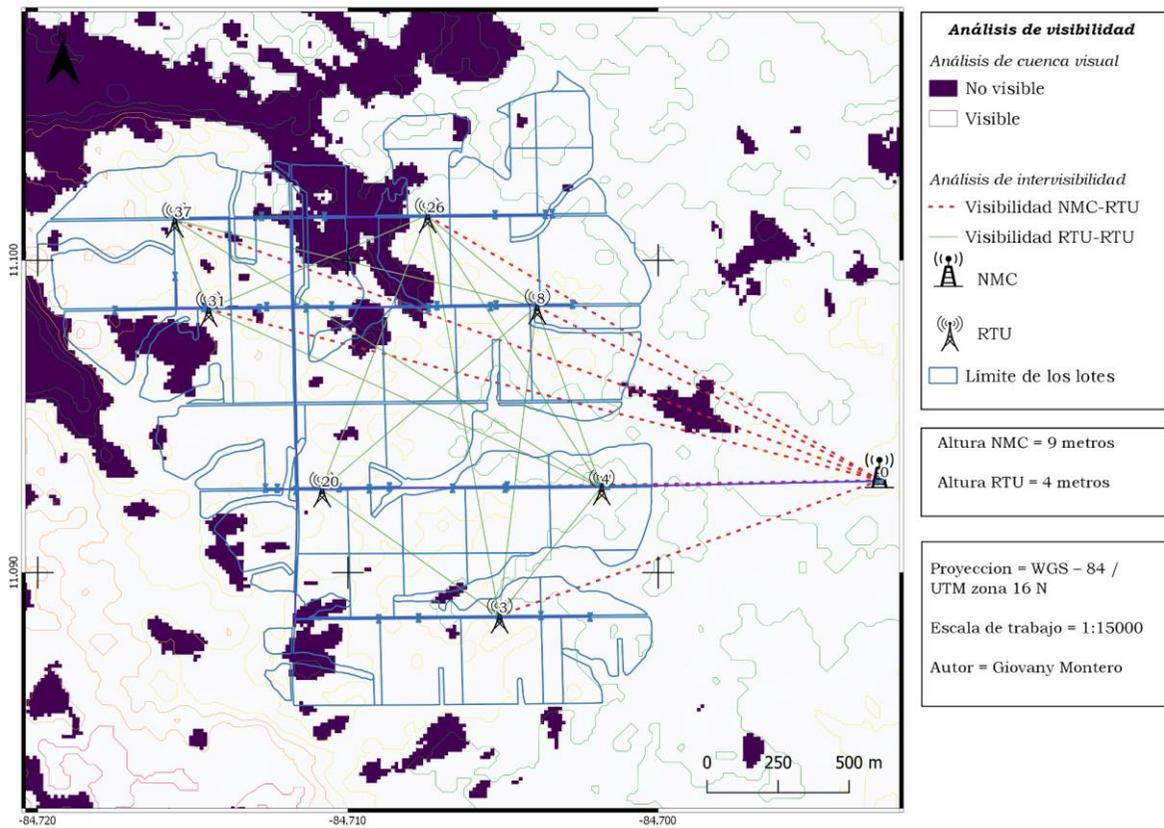


Ilustración 24. Análisis de visibilidad para el resultado obtenido con el algoritmo de selección.

En la ilustración 24, las líneas verdes continuas corresponden a un análisis de intervisibilidad entre RTU, lo cual indica que todas las antenas pueden tener acceso a una señal de radio repetida desde los RTU vecinos. En caso de que la señal repetida no pueda ser generada, se debe ya sea utilizar otro de los resultados obtenidos con el algoritmo (Ilustración 23), incrementar el tamaño del tubo que soporta la antena o mover el equipo receptor a una de las zonas visibles, zonas blancas en el mapa.

Al obtener un diseño viable, se procede a realizar un listado de materiales. Como en todos los proyectos, es necesario conocer la cantidad de PE y para ello, se utiliza el resultado obtenido con el procedimiento nuevo (tabla 11) para elaborar el despiece de materiales (Tabla 12); no se toman en cuenta repuestos, conectores o accesorios de PVC.

Tabla 12. Listado de materiales utilizando la metodología estandarizada.

<i>Cantidad</i>	<i>Nombre</i>
1	R-NET Unidad anfitriona y accesorios
1	Controlador NMC-Pro + licencia
7	R-NET RTU Expandible
19	R-NET Tarjetas de expansión
7	R-NET Antenas para transmisión de señal 6 m
7	R-NET Kit para panel solar 9 V 3 W
7	R-NET Baterías 6 V 1.2 AH
40	Relés hidráulicos de 3 Vías
0	Ecualizadores topográficos (TED)
1	Resortes para relé (Amarillo)
9	Tubo de PE de 8 mm 1000 m
40	Solenoides DC Aquative
7	Elementos necesarios para conexión a tierra

El equipo de control se conforma igualmente por un host, un NMC y su respectiva licencia. En campo son necesarias 7 unidades RTU y 19 tarjetas de expansión, 7 antenas, 7 paneles solares, 7 baterías, 40 relés hidráulicos, 40 válvulas solenoides, 9 rollos de PE de 8 mm y 7 kits para hacer la conexión a tierra (Tabla 12). Para indicar la cantidad de válvulas TED y resortes para relé, se hace un análisis por separado tomando en cuenta los criterios de la sección 2.3.4.

4.4 Comparación de métodos

Ambos procedimientos presentados tienen como principio definir la conexión de válvulas y antenas que, a través de una serie de cálculos hidráulicos y comparaciones permiten verificar un diseño de automatización factible. Los cálculos para la automatización provienen de un conjunto de datos del diseño de riego agronómico e hidráulico.

Los principales aspectos que diferencian los procedimientos actual y propuesto consisten en su capacidad de procesamiento de información y obtención de un resultado fiable en menor tiempo. De utilizarse correctamente, ambas metodologías permiten alcanzar un resultado fiable, no obstante, una metodología programada posee ventajas como un mejor rastreo y seguimiento de información, así como una mejora en los tiempos de trabajo y una disminución del costo total del proyecto.

Aunque el nuevo procedimiento tiene bases en el diseño original de La Empresa, tiene mejoras en aspectos tales como la consideración de todas las opciones posibles y la verificación de comunicación de señales de apertura o cierre de válvulas.

Al tomar en cuenta todas las potenciales soluciones para automatizar las válvulas, el nuevo procedimiento le permite al diseñador desentenderse de dos procesos subjetivos, lo que conlleva a disminuir el tiempo de trabajo: el primero de ellos es la selección de la ubicación de los RTU, como es un procedimiento de prueba y error, utilizando el método original el diseñador debe permitirse varios intentos hasta encontrar la mejor opción para una zona en específico, válvula por válvula. Un proyecto puede poseer varias decenas de válvulas, lo que lo puede convertir en un proceso desgastante, que puede llevar a que se cometan errores en el intento; el segundo proceso automatizado es el ingreso de las distancias de separación entre el RTU y la válvula a automatizar, también un proceso de prueba y error en donde la distancia cambia cada vez que se sustituye la ubicación del RTU que, a su vez, depende de otros factores como desnivel y presión. El nuevo procedimiento tiene la capacidad de analizar todas las posibilidades de manera instantánea, generando una tabla

con todos los desenlaces posibles para que después sea analizada por un algoritmo de selección que efectúa el trabajo del diseñador.

La transformación de la metodología de diseño incluye variables al proceso con tal de asegurar el éxito de ese resultado teórico en campo, por ejemplo, se empieza a tomar en consideración la línea de vista entre antenas RTU en una etapa temprana, variable que en el proceso anterior se tomaba en cuenta hasta que las antenas estaban en campo, provocando problemas de funcionamiento o falta de materiales, esta modificación permite realizar menos cambios en la fase final de instalación.

La mejora también permite agregar un factor de seguridad a los valores de presión, desnivel y separación. Cada parámetro puede ser modificado en cualquier momento sin que exista la necesidad de realizar algún cambio en las fórmulas o el proyecto en general, lo que le permite al usuario variar el diseño hasta conseguir uno que le genere confianza o comodidad.

Este proceso nuevo es sumamente útil en proyectos de muchas válvulas que se encuentran, o no, relativamente cercanas entre sí, en donde un análisis para saber cuál de todas las opciones conlleva a un menor número de RTU en campo es complicado. Reemplaza el método anterior de colocar las antenas en grupos de válvulas sin tener seguridad de éxito y lo sustituye por un método numérico y preciso.

La tabla 13 muestra la diferencia en la cantidad de materiales al utilizar ambos procedimientos en el mismo proyecto. Aunque es posible que el diseñador llegue a los mismos resultados que con el procedimiento nuevo, no se tiene la certeza de que esto ocurra.

Tabla 13. Comparación del listado de materiales entre métodos.

Nombre	Cantidad		Diferencia
	Procedimiento original	Procedimiento propuesto	
<i>R-NET Unidad anfitriona y accesorios</i>	1	1	0
<i>Controlador NMC-Pro + licencia</i>	1	1	0
<i>R-NET RTU Expandible</i>	9	7	-2
<i>R-NET Tarjetas de expansión</i>	19	19	0
<i>R-NET Antenas para transmisión de señal 6 m</i>	9	7	-2
<i>R-NET Kit para panel solar 9 V 3 W</i>	9	7	-2
<i>Ecuilibradores topográficos (TED)</i>	8	0	-8
<i>Resorte para Relé</i>	-	1	N/A
<i>R-NET Baterías 6 V 1.2 AH</i>	9	7	-2
<i>Relés hidráulicos de 3 vías</i>	40	40	0
<i>Tubo de PE de 8 mm 1000 m</i>	8 (7370 m)	9 (8134 m)	+1
<i>Solenoides DC Aquative</i>	40	40	0
<i>Elementos necesarios para conexión a tierra</i>	9	7	-2

Nota: N/A: No aplica

La cantidad de NMC, Host y licencia son iguales en ambos proyectos. El cambio ocurre en la cantidad de RTU y sus componentes, en comparación con el procedimiento actual, el nuevo resulta en dos RTU menos en campo y por ende una menor cantidad de paneles solares, baterías, antenas y kits a tierra, lo que se traducen en un ahorro en el monto de la inversión inicial.

Al analizar la cantidad de tarjetas de expansión en ambos procedimientos sucede algo interesante: tanto el procedimiento actual como propuesto utilizan la misma cantidad de tarjetas (19 en total), a pesar de que el método actual utiliza más antenas RTU. En el procedimiento nuevo, cada RTU debe ahora acoger más válvulas y por ende aumentar su capacidad nominal. En el procedimiento actual, ocurre que en ciertas antenas RTU, quedan puertos de conexión sin utilizar en el control de un grupo de válvulas, lo que hace que el número de tarjetas de expansión aumente.

Adicionalmente en el procedimiento propuesto, el incremento en la cantidad de rollos de PE ocurre debido a la disminución en la cantidad de RTU, esto se traduce en distancias más largas entre los pares RTU-válvulas, pues existen menos RTU distribuidos en el área de la finca. Esto genera la idea de que se podría optimizar el algoritmo para que tome en consideración esta variable a la hora de mostrar los resultados. Por ejemplo, al seleccionar la iteración 66 de la ilustración 22, sería necesario utilizar 8 900 m de PE en lugar de los 8 134 m generados al seleccionar la iteración 105.

La disminución en la cantidad de válvulas TED se puede deber a que cuando se ingresa el valor mínimo de presión restante, indirectamente se está limitando a que no se permitan enlaces a válvulas cuya diferencia de altura es muy alta y eso resulta en una menor cantidad. Al disminuir ese límite inferior de presión restante y permitir presiones restantes bajas, se crea la posibilidad de que se den más enlaces hidráulicos, pero posiblemente también incremente la cantidad de válvulas TED e incremente también la probabilidad de que el proyecto falle. Sin embargo, eso puede resultar en una menor cantidad de RTU disminuyendo el costo del proyecto, por lo que queda a criterio de diseñador seleccionar los valores correctos.

El procedimiento propuesto para la automatización considera la totalidad de los enlaces disponibles en la red y su efecto en la automatización, esto se logra comparando los parámetros de entrada máximos y mínimos definidos por el usuario con una matriz de datos conformada por cálculos de presión, desnivel y distancia para cada nodo de la red dando la totalidad de $4n^2$ resultados en donde n es el número total de válvulas de control. En resumen, aun cuando se incrementa la cantidad de datos que procesar, se logra una simplificación del método, la metodología propuesta es capaz de adaptarse a diferentes proyectos sin importar la estructura de la finca o comportamiento de la red hidráulica. La única manipulación de datos por parte del diseñador es el ingreso de datos de presión, elevación y distancias, se elimina la ubicación de RTU de manera empírica y se simplifica la manera en la que se verifican las presiones restantes y las distancias de separación. Al ser un análisis cuantitativo este puede ser procesado por un computador, esta metodología propuesta es capaz de

disminuir errores debido a manipulación excesiva de datos causados por proponer una solución antes de realizar los cálculos respectivos, esto mejora los tiempos de trabajo pues los cálculos se realizan una única vez.

El procedimiento propuesto podría normalizar el diseño de la automatización pues se basa únicamente en comparaciones lógicas para llegar a una conclusión. Al utilizarse, se puede definir si es posible o no la automatización de una finca sin importar la forma de esta, comportamiento de la red hidráulica, ubicación, cantidad de válvulas hidráulicas o diseñador que la utilice, siempre y cuando sean las señales de radio y comando hidráulico el módulo de control. Indiferentemente de la cantidad de válvulas hidráulicas, el procedimiento es el mismo, basta con incrementar el tamaño de las matrices creadas, es decir aumentar la capacidad de procesamiento de la plantilla.

CONCLUSIONES

1. Se definió e interpretó los parámetros necesarios para el diseño de la automatización de un sistema de riego por goteo utilizando señales de radio y comando hidráulico; siendo la presión aguas arriba de cada válvula, la distribución de las tuberías y válvulas en la finca y la elevación de cada una de las válvulas parámetros para el inicio de los cálculos y factores.
2. Se empleó el procedimiento actual de diseño de automatización de sistema de riego por goteo creado por La Empresa, que, aunque provee un resultado factible, presenta dificultades en el diseño que puede ser mejorado; eliminando la subjetividad del diseñador al colocar las RTU y disminuir equipo necesario con su costo asociado.
3. Se diseñó una nueva metodología que considera todos los posibles enlaces de automatización del proyecto, un procedimiento que elimina la subjetividad del diseñador al colocar las antenas, y que permite hacer un análisis profundo de toda la red, optimizando el número de unidades terminales remotas y accesorios, lo que disminuye directamente el costo del proyecto.

RECOMENDACIONES

Para asegurar un correcto funcionamiento del sistema una vez sea instalado en campo, es recomendable validar los datos de entrada utilizados en los cálculos (presiones, elevaciones y distancias provenientes del diseño hidráulico), pues los valores reales pueden variar a los teóricos calculados en el diseño hidráulico. De lo contrario, el diseñador debería utilizar un buen margen de seguridad a la hora de ingresar los valores máximos y mínimos utilizados en la filtración de datos.

El método propuesto para este trabajo final de graduación se diseñó para que pueda ser utilizado en cualquier finca que desee valerse del comando hidráulico y las señales de radio como método de automatización. Sería provechoso realizar pruebas de campo en diferentes proyectos en donde se pueda verificar que los enlaces propuestos funcionen correctamente, es decir: corroborar el desnivel máximo y mínimo óptimo de trabajo, la distancia de separación máxima permitida, la presión mínima permitida en el relé hidráulico y el diámetro de microtubo óptimo de trabajo, es difícil encontrar información teórica precisa que respalden estos valores.

El uso de imágenes satelitales de alta resolución permite identificar con mayor precisión posibles interferencias en las señales de radio, lo cual lleva a proporcionar mejores ubicaciones para los RTU en caso de que sea necesario reubicar. Al momento de realizar un levantamiento topográfico de la finca, puede ser provechoso incluir todos los posibles obstáculos ajenos a la topografía del terreno, como por ejemplo la altura de árboles cercanos a las válvulas, la altura de las plantaciones o edificaciones en caso de que las haya.

Debido a que el resultado es una metodología, existen muchas maneras de llevarla a cabo siempre y cuando se sigan los pasos recomendados. Para la siguiente fase se recomienda programar todo el proceso en Qgis, utilizando la librería PyQgis que se basa en el lenguaje de programación Python orientado a objetos, esto modernizaría más el proceso y se podrían manipular todos los resultados en un mismo software.

BIBLIOGRAFÍA

1. Arviza, J. (1996). *Riego localizado*. Valencia: Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria .
2. ASF DAAC. (13 de Enero de 2011). *DATA*. Recuperado el 29 de Julio de 2020, de Earthdata: <https://search.asf.alaska.edu/#/>
3. Carrazón, J. (Octubre de 2007). Recuperado el 27 de Junio de 2020, de Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO): <http://www.fao.org/3/a-at787s.pdf>
4. Chaudhary, D., Nayse, S., & Waghmare, L. (Febrero de 2011). Application of Wireless Sensor Networks for Greenhouse Parameter Control in Precision Agriculture. *International Journal of Wireless & Mobile Networks*, 1, 140-149.
5. Čučković, Z. (s.f.). *Quantum GIS plugin for visibility analysis*. Recuperado el 2 de Julio de 2020, de Zoran Cuckovic Web Site: <http://www.zoran-cuckovic.from.hr/QGIS-visibility-analysis/>
6. Dorot. (Enero de 2019). *Products & Solutions: Dorot*. Recuperado el 14 de Noviembre de 2020, de Dorot: <https://www.dorot.com/products-solutions/hydraulic-control-valves/pilot-valves/dorot-pilot-valves-range>
7. Gul, S., & Khan, M. F. (Diciembre de 2010). Automatic Extraction of Contour Lines from Topographic Maps. *2010 International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications*, 593-598.
8. Harrys, C. (2006). *standard dimensions ratio (SDR)*. (C. Harrys, Editor, & McGraw-Hill) Recuperado el 16 de Junio de 2020, de Dictionary of architecture and construction (4th ed.): https://search-credoreference-com.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr/content/title/mhbuilding?tab=entry_view&heading=standard_dimensions_ratio_sdr&sequence=0

9. Hearnshaw, H. M., & Unwin, D. J. (1994). Visualization in Geographical Information Systems. *Wiley*, 168–180.
10. Leblanc, T., Trickl, T., & Vogelmann, H. (2013). Lidar. En T. Leblanc, T. Trickl, & H. Vogelmann, *Monitoring Atmospheric Water Vapour* (págs. 113 -158). New York: Springer, New York.
11. Lee, H., Fang, Y., Lee, B., & King, C. (Junio de 2012). The Tube: A Rapidly Deployable Wireless Sensor Platform for Supervising Pollution of Emergency Work. *IEEE*, 2776 - 2786.
12. Marquina, J. J., & Mogollón, A. R. (Julio de 2018). Niveles y Escalas: Levantamiento de información geográfica en sensores remotos. *Revista Geográfica Venezolana*, 59(1), 42-52.
13. Mott, R. L. (2006). *Mecánica de Fluidos* (Sexta ed.). México: Pearson Education.
14. Moya Talens, J. A. (2009). *Riego Localizado y Fertirrigación*. Madrid, España: Mundi-Prensa.
15. Mozas Calvache, A. T., & Ureña Cámara, M. A. (2013). Accuracy of contour lines using 3D bands. *International Journal of Geographical Information Science*, 27(12), 2362–2374.
16. MT Hydraulics. (s.f.). *TED*. Recuperado el 19 de julio de 2020, de MT Hydraulics: <http://www.m-t-hydraulics.com/Ted.html>
17. NASA. (2020). *Earth Data Search*. Obtenido de Earth Data: <https://search.earthdata.nasa.gov/search>
18. Netafim. (9 de julio de 2009). *Crop Management Technologies; RadioNet User Manual*. Recuperado el 3 de Marzo de 2020, de Netafim: <https://www.netafim.com/en/digital-farming/netbeat/Monitor/radionet/>

19. Netafim. (Noviembre de 2010). *Products: RadioNet*. Recuperado el 10 de Julio de 2020, de Netafim: <https://dev.netafimusa.com/wp-content/uploads/2016/08/A121-RadioNet-Brochure.pdf>
20. Netafim. (2018). *Valves: series 100*. Recuperado el 18 de Junio de 2020, de Netafim: https://www.netafim.com/4afaba/globalassets/products/valves/100-series_metal-control-valves.pdf
21. Oliveira, L. M., & Rodrigues, J. (Abril de 2011). Wireless Sensor Networks: A Survey on Environmental Monitoring. *Journal of Communications*, 6(2), 143-151.
22. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2007). Drip irrigation. En A. Phocaidis, *HANDBOOK ON PRESSURIZED* (págs. 14.1-14.11). ROMA: FAO.
23. Pizarro, F. (1996). *Riegos localizados de Alta Frecuencia (RLAF) : goteo, microaspersión, exudación* (Tercera ed.). Madrid, España: Mundi-Prensa.
24. Proyecto QGIS. (11 de Junio de 2020). *Documentos: Documentación para Qgis 3.10*. Recuperado el 18 de Junio de 2020, de Documentación Qgis: <https://docs.qgis.org/3.10/en/docs/>
25. Raffler, C. (2018). *QNEAT3*. Recuperado el 2 de Julio de 2020, de <https://root676.github.io/>: <https://root676.github.io/OdMatrixAlgs.html#>
26. Rizzi, M. (17 de Abril de 2020). Dorot Education . *Control Local y Remoto*.
27. Rui, X. P., Yu, X. T., Lu, J., Ashraf, M. A., & Song, X. F. (01 de Abril de 2016). An algorithm for generation of DEMs from contour lines considering geomorphic features. *Earth sciences research journal*, 20(2).
28. Ruiz Canales, A., & Molina Martínez, J. M. (2010). *Automatización y telecontrol de sistemas de riego* (1era ed.). (C. O. Murcia, Ed.) Barcelona: Digitalia.

29. Taopanta, D. P. (2015). *Diseño e implementación de un módulo didáctico para realizar procesos de verificación y escariado de piezas mecánicas en el Laboratorio de Neutrónica e Hidrónica*. Thesis, Universidad de las Fuerzas Armadas, Departamento de Eléctrica y Electrónica.
30. The Cambridge Encyclopedia of the Language Sciences. (2011). *Standardization* (1st ed.). (P. C. Hogan, Ed.) Cambridge University Press. Recuperado el 2020 de Diciembre de 2020, de <https://search-credoreference-com.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr/content/entry/cupelanscis/standardization/0>
31. United States Department of Agriculture. (1997). *Irrigation Guide*. Texas: USDA. Recuperado el 23 de Junio de 2020, de https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs144p2_033068.pdf
32. Wahlin, B., & Zimbelman, D. (2014). ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice. En T. C. Engineers, *Canal Automation for Irrigation Systems*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers.
33. Wang, N., Zhang, N., & Wang, M. (Enero de 2006). Wireless sensors in agriculture and food industry—Recent development and future perspective. *Computers and Electronics in Agriculture*, 50(1), 1-14.
34. Wood, J., & Fisher, P. F. (1993). Assessing interpolation accuracy in elevation models. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 48-56.
35. Yunseop, J., Evans, R., & Iversen, W. (Julio de 2008). Remote Sensing and Control of an Irrigation System Using a Distributed Wireless Sensor Network. *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, 57(7), 1379-1387.

APÉNDICE

Apéndice A. Diseño agronómico del sistema de riego

El diseño agronómico consiste en determinar las necesidades totales de agua para el riego, el número de emisores por planta, la separación entre emisores, así como las dosis y tiempo de riego, datos básicos para un posterior diseño hidráulico y una gestión eficiente de la instalación (Arviza, 1996). Algunos de esos parámetros se listan en la tabla 14 y son utilizados, junto con algunos más, para construir los cálculos característicos de un diseño agronómico.

Aunque no se utilice de manera directa en el diseño de automatización, el diseño agronómico se presenta con el objetivo de tener una visión general de la finca. Los parámetros de diseño se encuentran en la bitácora del proyecto, un resumen del sistema de riego y es proporcionado por La Empresa. En él, se describe el intervalo de riego, la eficiencia de aplicación, la evapotranspiración de cultivo, el tiempo de riego disponible, el emisor utilizado, la descarga del emisor en L/h, la presión mínima de operación en mca, el espaciamiento del emisor en metros y el espaciamiento de los laterales en metros.

Tabla 14. Datos disponibles para el diseño del sistema de riego.

<i>Frecuencia de riego</i>	1 día
<i>Eficiencia de aplicación</i>	0.95 %
<i>Área</i>	284.00 Ha
<i>Separación emisor</i>	0.5 m
<i>Separación entre laterales</i>	8.00 m
<i>ETC</i>	4 mm/día
<i>Cultivo</i>	Árboles de naranja
<i>Tiempo Disponible</i>	22 h
<i>Gotero</i>	Uniram
<i>Modelo</i>	16010
<i>Caudal</i>	2.3 L/h
<i>Presión de operación</i>	0.5 Bar

Con la información de la tabla anterior es posible calcular una lámina neta y bruta de riego, la precipitación horaria, el tiempo de riego necesario para aplicar esa lámina de agua, el número de operaciones posibles, el área por operación, una cantidad aproximada de la cantidad de goteros y por lo tanto un caudal aproximado de operación (Tabla 15).

Tabla 15. Corroboración de datos calculados por el departamento de ingeniería de Netafim.

<i>Cálculos</i>			
<i>Verificación de Q disponible</i>	$Q = (10 \cdot A \cdot ETC) / (Td \cdot \eta)$	569.42	m ³ /h
<i>ETC</i>		4.00	mm/día
<i>Fr</i>		1.00	Día
<i>Ln</i>	$Ln = Fr \cdot ETC$	4.00	mm
<i>Lb</i>	$Lb = Ln/na$	4.21	mm
<i>Precipitación</i>	$Pp = Qemisor / (Sg \cdot Sl)$	0.575	mm/h
<i>Tiempo de riego</i>	$Tr = Lb/pp$	7.32	h
<i>Tiempo disponible</i>	Td	22	h
<i>Tr < Td</i>		Se cumple	
<i>Nop</i>	$Nop = Td/tr$	3.01	op
<i>Nop corregido</i>		3.00	op/día
<i>Área operación</i>	$Arop = Atotal/Nop$	94.67	ha/op
		946666.7	m ² /op
<i>Cantidad de goteros teóricos</i>	$\#goteros = Atotal / (Sg \cdot Sl)$	710000.0	goteros
<i>Qop</i>	$Qop = (\#goteros/Nop) \cdot qemisor$	544333.33	L/h
<i>Q de al menos para 94.67 ha</i>		544.33	m ³ /h

Apéndice B. Diseño hidráulico del sistema de riego por goteo

El diseño hidráulico del sistema de riego es construido con ayuda del programa informático Irricad V17. Como resultado se obtienen documentos o “reportes” (tabla 16) en los cuales se presenta, en formato de tabla, distintas características del sistema de riego diseñado, por ejemplo, la cantidad de válvulas necesarias, el área de cubren, tipo de válvula, caudal, presión antes de la válvula, presión requerida en la válvula, presión después de la válvula, presión mínima en los goteros, presión máxima en los goteros, caudal promedio en los goteros y su variación de flujo.

Tabla 16. Reporte de presiones y caudales de bombeo

Turno	Nombre de la Zona	Área (Ha)	Tipo de Válvula	Caudal (m3/h)	Presión antes de la Válvula (m.c.a.)	Presión requerida en la Válvula (m.c.a.)	Presión después de la válvula (m)	Presión Mínima en los goteros (m.c.a.)	Presión Máxima en los goteros (m.c.a.)	Caudal Promedio del Gotero (l/h)	Variación de Caudal (%)
I	Área.12	1.55	VAL REG Dorot 75-2" PLAST, NPT + 3 Vías	8.83	26.9	24.1	24	10.45	24.06	2.3	0
	Área.3	3.58	VAL REG Dorot 75-2" PLAST, NPT + 3 Vías	20.71	28.7	22.8	22	9.98	28.22	2.3	0
	Área.2	3.11	VAL REG Dorot 75-2" PLAST, NPT + 3 Vías	18.01	29.5	23.6	23	10.29	22.95	2.3	0
	Área.6	3.35	VAL REG Dorot 75-2" PLAST, NPT + 3 Vías	19.42	42.9	24.7	24	10.23	23.95	2.3	0
	Área.5	4.62	VAL REG Dorot 75-2" PLAST, NPT + 3 Vías	26.86	44.2	27.3	26	10.1	27.53	2.3	0
	Área.8	13.06	VAL REG Dorot 96-4" PVC, + 3 VÍAS	75.08	23.8	23.3	22	10.94	24.49	2.3	0
	Área.10	10.54	VAL REG Dorot 96-3" PVC, + 3 VÍAS	61.03	22	22.8	20	9.37	21.67	2.3	0
	Área.14	7.75	VAL REG Dorot 96-3" PVC, + 3 VÍAS	45.71	28.3	23.1	22	10.47	24.97	2.3	0
	Área.13	7.29	VAL REG Dorot 96-3" PVC, + 3 VÍAS	42.46	27.2	23.9	23	10.62	25.75	2.3	0
	Área.1	8.48	VAL REG Dorot 96-3" PVC, + 3 VÍAS	48.63	29.1	25.2	24	10.12	23.48	2.3	0
	Área.7	8.00	VAL REG Dorot 96-3" PVC, + 3 VÍAS	45.91	44.7	25.1	24	10.99	25.76	2.3	0
Área.4	8.03	VAL REG Dorot 96-3" PVC, + 3 VÍAS	46.42	45.8	22.1	21	10.19	25.85	2.3	0	
Área.9	8.20	VAL REG Dorot 96-4" PVC, + 3 VÍAS	46.55	23.8	19.5	19	10.11	23.67	2.3	0	
Área.11	9.64	VAL REG Dorot 96-3" PVC, + 3 VÍAS	55.23	23.5	21.5	20	10.21	20.79	2.3	0	

Continúa...

2	Área.26	8.14	VAL REG Dorot 96- 3" PVC, + 3 VÍAS	46.3	30.5	22.1	21	10.43	27.76	2.3	0
	Área.17	8.48	VAL REG Dorot 96- 3" PVC, + 3 VÍAS	49.41	26.2	21.2	20	10.57	22.46	2.3	0
	Área.16	8.48	VAL REG Dorot 96- 3" PVC, + 3 VÍAS	49.26	25.3	22.2	21	10.29	16.89	2.3	0
	Área.15	8.48	VAL REG Dorot 96- 3" PVC, + 3 VÍAS	49.27	24.9	23.2	22	10.74	19.77	2.3	0
	Área.20	7.27	VAL REG Dorot 96- 3" PVC, + 3 VÍAS	42.47	32.8	28.9	28	9.71	30.41	2.3	0
	Área.19	8.00	VAL REG Dorot 96- 3" PVC, + 3 VÍAS	46.64	34.8	30.1	29	9.43	29.57	2.3	0
	Área.18	7.99	VAL REG Dorot 96- 3" PVC, + 3 VÍAS	45.72	41.8	34.1	33	10.93	28.42	2.3	0
	Área.22	8.63	VAL REG Dorot 96- 3" PVC, + 3 VÍAS	48.74	31.7	26.2	25	10.23	22.79	2.3	0
	Área.21	8.07	VAL REG Dorot 96- 3" PVC, + 3 VÍAS	46.58	35	32.1	31	10.12	32.14	2.3	0
	Área.24	8.43	VAL REG Dorot 96- 4" PVC, + 3 VÍAS	47.96	30.5	23.5	23	10.48	26.75	2.3	0
	Área.23	8.43	VAL REG Dorot 96- 4" PVC, + 3 VÍAS	48.29	33	24.5	24	10.97	18.99	2.3	0
	Área.25	6.87	VAL REG Dorot 96- 4" PVC, + 3 VÍAS	40.11	31.7	21.3	21	10.75	25.05	2.3	0

Continúa...

3

Área.27	7.78	VAL REG Dorot 96- 3" PVC, + 3 VÍAS	44	34.1	27	26	9.62	27.78	2.3	0
Área.36	8.31	VAL REG Dorot 96- 3" PVC, + 3 VÍAS	47.98	24.3	23.2	22	10.67	21.98	2.3	0
Área.37	4.29	VAL REG Dorot 75-2" PLAST, NPT + 3 Vias	24.69	25.7	25.1	24	8.16	23.98	2.3	0
Área.40	10.35	VAL REG Dorot 96- 3" PVC, + 3 VÍAS	59.33	25.9	24.7	23	10.78	26.01	2.3	0
Área.39	2.81	VAL REG Dorot 75-2" PLAST, NPT + 3 Vias	15.96	29.9	24.5	24	10.6	23.15	2.3	0
Área.38	3.34	VAL REG Dorot 75-2" PLAST, NPT + 3 Vias	18.81	32.6	25.6	25	10.04	23.67	2.3	0
Área.29	2.63	VAL REG Dorot 75-2" PLAST, NPT + 3 Vias	15.35	33	20.4	20	10.19	15.69	2.3	0
Área.32	5.70	VAL REG Dorot 96- 3" PVC, + 3 VÍAS	32.62	27.8	27.6	27	8.52	26.09	2.3	0
Área.31	7.54	VAL REG Dorot 96- 4" PVC, + 3 VÍAS	44	29.3	22.4	22	10.79	23.17	2.3	0
Área.35	6.01	VAL REG Dorot 75-2" PLAST, NPT + 3 Vias	35.25	29.2	27.2	25	10.48	16.13	2.3	0
Área.34	6.34	VAL REG Dorot 96- 3" PVC, + 3 VÍAS	36.18	27.6	23.7	23	10.86	18.31	2.3	0
Área.28	9.56	VAL REG Dorot 96- 3" PVC, + 3 VÍAS	54.22	33.3	23.4	22	10.9	20.29	2.3	0
Área.30	7.16	VAL REG Dorot 96- 4" PVC, + 3 VÍAS	40.04	27.2	19.3	19	10.02	19.09	2.3	0
Área.33	5.99	VAL REG Dorot 75-2" PLAST, NPT + 3 Vias	32.83	30.1	25.9	24	10.64	24.29	2.3	0

Del diseño hidráulico se obtiene también un plano (ilustración 25) en donde se muestra información del sistema, información del diseño agronómico, información del diseño hidráulico, así como la ubicación y distribución de la tubería principal, tubería secundaria y válvulas del sistema. Realizar los diseños en un programa informático como Irricad permite trabajar con archivos georreferenciados por lo que se puede obtener también la elevación de cada válvula en cualquier momento, la elevación es un parámetro clave a la hora de realizar diseños de sistemas hidráulicos.

Según el diseño hidráulico descrito en la bitácora del proyecto, este se desarrolla con un único bombeo, el cual se divide en 3 turnos de riego con un caudal requerido de 562 m³/h (2473 gpm). La carga dinámica total requerida para que el sistema opere en óptimas condiciones es de 55 mca (78 psi) y se utilizó como emisor la manguera Uniram 16010 de 2.3 L/h.

Se deben automatizar entonces 40 válvulas de control de la marca Dorot de 2, 3 y 4 pulgadas de diámetro ubicadas en distintas zonas de la finca. El método de automatización a utilizar es remoto hidráulico accionado por señales de radio y la ubicación del controlador principal es la misma del cabezal de riego.

ANEXOS

Anexo A: Resultados sin filtrar

Tabla 17. Resultados con el método propuesto.

#	Antena en 1			Antena en 2			Antena en 3			Antena en 4		
	DN	DP	PR	DN	DP	PR	DN	DP	PR	DN	DP	PR
1	0,00	29,10	8,73	-2,36	25,73	11,49	-4,12	23,21	12,45	0,67	30,06	24,76
2	2,36	32,87	6,09	0,00	29,50	8,85	-1,76	26,99	9,81	3,03	33,83	22,12
3	4,12	34,59	4,89	1,76	31,21	7,65	0,00	28,70	8,61	4,79	35,54	20,92
4	-0,67	44,84	MA	-3,03	41,47	MA	-4,79	38,96	MA	0,00	45,80	13,74
5	1,16	45,86	MA	-1,20	42,49	MA	-2,96	39,97	MA	1,83	46,81	13,03
6	-0,39	42,34	MA	-2,75	38,97	MA	-4,51	36,46	3,18	0,28	43,30	15,49
7	-2,29	41,43	MA	-4,65	38,06	MA	-6,41	35,54	3,82	-1,62	42,39	16,13
8	6,20	32,66	6,24	3,84	29,29	9,00	2,08	26,77	9,96	6,87	33,61	22,27
9	5,97	32,33	6,47	3,61	28,96	9,23	1,85	26,44	10,19	6,64	33,29	22,50
10	6,19	30,84	7,51	3,83	27,47	10,27	2,07	24,96	11,23	6,86	31,80	23,54
11	6,00	32,07	6,65	3,64	28,70	9,41	1,88	26,19	10,37	6,67	33,03	22,68
12	0,56	27,70	9,71	-1,80	24,33	12,47	-3,56	21,81	13,43	1,23	28,66	25,74
13	0,78	28,31	9,28	-1,58	24,94	12,04	-3,34	22,43	13,00	1,45	29,27	25,31
14	3,06	32,67	6,23	0,70	29,30	8,99	-1,06	26,79	9,95	3,73	33,63	22,26
15	4,40	31,19	7,27	2,04	27,81	10,03	0,28	25,30	10,99	5,07	32,14	23,30
16	4,80	32,16	6,59	2,44	28,79	9,35	0,68	26,27	10,31	5,47	33,11	22,62
17	5,19	33,61	5,57	2,83	30,24	8,33	1,07	27,73	9,29	5,86	34,57	21,60
18	-2,18	38,69	MA	-4,54	35,31	4,78	-6,30	32,80	5,74	-1,51	39,64	18,05
19	2,29	38,07	MA	-0,07	34,70	5,21	-1,83	32,19	6,17	2,96	39,03	18,48
20	3,32	37,54	MA	0,96	34,17	5,58	-0,80	31,66	6,54	3,99	38,50	18,85
21	2,65	38,79	MA	0,29	35,41	4,71	-1,47	32,90	5,67	3,32	39,74	17,98
22	4,76	38,50	MA	2,40	35,13	4,91	0,64	32,61	5,87	5,43	39,46	18,18
23	1,41	35,01	4,59	-0,95	31,64	7,35	-2,71	29,13	8,31	2,08	35,97	20,62
24	4,38	36,76	3,37	2,02	33,39	6,13	0,26	30,87	7,09	5,05	37,71	19,40
25	2,70	35,56	4,21	0,34	32,19	6,97	-1,42	29,67	7,93	3,37	36,51	20,24
26	3,97	36,17	3,78	1,61	32,80	6,54	-0,15	30,29	7,50	4,64	37,13	19,81
27	2,91	38,26	MA	0,55	34,89	5,08	-1,21	32,37	6,04	3,58	39,21	18,35
28	3,27	37,97	MA	0,91	34,60	5,28	-0,85	32,09	6,24	3,94	38,93	18,55
29	3,02	37,31	MA	0,66	33,94	5,74	-1,10	31,43	6,70	3,69	38,27	19,01
30	6,00	35,77	4,06	3,64	32,40	6,82	1,88	29,89	7,78	6,67	36,73	20,09
31	2,75	33,23	5,84	0,39	29,86	8,60	-1,37	27,34	9,56	3,42	34,19	21,87
32	1,67	30,19	7,97	-0,69	26,81	10,73	-2,45	24,30	11,69	2,34	31,14	24,00
33	3,59	35,23	4,44	1,23	31,86	7,20	-0,53	29,34	8,16	4,26	36,19	20,47
34	5,65	35,67	4,13	3,29	32,30	6,89	1,53	29,79	7,85	6,32	36,63	20,16
35	2,62	32,94	6,04	0,26	29,57	8,80	-1,50	27,06	9,76	3,29	33,90	22,07
36	5,01	31,46	7,08	2,65	28,09	9,84	0,89	25,57	10,80	5,68	32,41	23,11
37	5,05	32,91	6,06	2,69	29,54	8,82	0,93	27,03	9,78	5,72	33,87	22,09
38	0,52	33,34	5,76	-1,84	29,97	8,52	-3,60	27,46	9,48	1,19	34,30	21,79
39	3,01	34,20	5,16	0,65	30,83	7,92	-1,11	28,31	8,88	3,68	35,16	21,19
40	4,97	33,00	6,00	2,61	29,63	8,76	0,85	27,11	9,72	5,64	33,96	22,03

Continúa...

#	Antena en 5			Antena en 6			Antena en 7			Antena en 8		
	DN	DP	PR									
1	-1,16	27,44	24,99	0,39	29,66	22,14	2,29	32,37	22,04	-6,20	20,24	9,63
2	1,20	31,21	22,35	2,75	33,43	19,50	4,65	36,14	19,40	-3,84	24,01	6,99
3	2,96	32,93	21,15	4,51	35,14	18,30	6,41	37,86	18,20	-2,08	25,73	5,79
4	-1,83	43,19	13,97	-0,28	45,40	11,12	1,62	48,11	11,02	-6,87	35,99	MA
5	0,00	44,20	13,26	1,55	46,41	10,41	3,45	49,13	10,31	-5,04	37,00	MA
6	-1,55	40,69	15,72	0,00	42,90	12,87	1,90	45,61	12,77	-6,59	33,49	MA
7	-3,45	39,77	16,36	-1,90	41,99	13,51	0,00	44,70	13,41	-8,49	32,57	MA
8	5,04	31,00	22,50	6,59	33,21	19,65	8,49	35,93	19,55	0,00	23,80	7,14
9	4,81	30,67	22,73	6,36	32,89	19,88	8,26	35,60	19,78	-0,23	23,47	7,37
10	5,03	29,19	23,77	6,58	31,40	20,92	8,48	34,11	20,82	-0,01	21,99	8,41
11	4,84	30,41	22,91	6,39	32,63	20,06	8,29	35,34	19,96	-0,20	23,21	7,55
12	-0,60	26,04	25,97	0,95	28,26	23,12	2,85	30,97	23,02	-5,64	18,84	10,61
13	-0,38	26,66	25,54	1,17	28,87	22,69	3,07	31,59	22,59	-5,42	19,46	10,18
14	1,90	31,01	22,49	3,45	33,23	19,64	5,35	35,94	19,54	-3,14	23,81	7,13
15	3,24	29,53	23,53	4,79	31,74	20,68	6,69	34,46	20,58	-1,80	22,33	8,17
16	3,64	30,50	22,85	5,19	32,71	20,00	7,09	35,43	19,90	-1,40	23,30	7,49
17	4,03	31,96	21,83	5,58	34,17	18,98	7,48	36,89	18,88	-1,01	24,76	6,47
18	-3,34	37,03	18,28	-1,79	39,24	15,43	0,11	41,96	15,33	-8,38	29,83	MA
19	1,13	36,41	18,71	2,68	38,63	15,86	4,58	41,34	15,76	-3,91	29,21	3,35
20	2,16	35,89	19,08	3,71	38,10	16,23	5,61	40,81	16,13	-2,88	28,69	3,72
21	1,49	37,13	18,21	3,04	39,34	15,36	4,94	42,06	15,26	-3,55	29,93	MA
22	3,60	36,84	18,41	5,15	39,06	15,56	7,05	41,77	15,46	-1,44	29,64	3,05
23	0,25	33,36	20,85	1,80	35,57	18,00	3,70	38,29	17,90	-4,79	26,16	5,49
24	3,22	35,10	19,63	4,77	37,31	16,78	6,67	40,03	16,68	-1,82	27,90	4,27
25	1,54	33,90	20,47	3,09	36,11	17,62	4,99	38,83	17,52	-3,50	26,70	5,11
26	2,81	34,51	20,04	4,36	36,73	17,19	6,26	39,44	17,09	-2,23	27,31	4,68
27	1,75	36,60	18,58	3,30	38,81	15,73	5,20	41,53	15,63	-3,29	29,40	3,22
28	2,11	36,31	18,78	3,66	38,53	15,93	5,56	41,24	15,83	-2,93	29,11	3,42
29	1,86	35,66	19,24	3,41	37,87	16,39	5,31	40,59	16,29	-3,18	28,46	3,88
30	4,84	34,11	20,32	6,39	36,33	17,47	8,29	39,04	17,37	-0,20	26,91	4,96
31	1,59	31,57	22,10	3,14	33,79	19,25	5,04	36,50	19,15	-3,45	24,37	6,74
32	0,51	28,53	24,23	2,06	30,74	21,38	3,96	33,46	21,28	-4,53	21,33	8,87
33	2,43	33,57	20,70	3,98	35,79	17,85	5,88	38,50	17,75	-2,61	26,37	5,34
34	4,49	34,01	20,39	6,04	36,23	17,54	7,94	38,94	17,44	-0,55	26,81	5,03
35	1,46	31,29	22,30	3,01	33,50	19,45	4,91	36,21	19,35	-3,58	24,09	6,94
36	3,85	29,80	23,34	5,40	32,01	20,49	7,30	34,73	20,39	-1,19	22,60	7,98
37	3,89	31,26	22,32	5,44	33,47	19,47	7,34	36,19	19,37	-1,15	24,06	6,96
38	-0,64	31,69	22,02	0,91	33,90	19,17	2,81	36,61	19,07	-5,68	24,49	6,66
39	1,85	32,54	21,42	3,40	34,76	18,57	5,30	37,47	18,47	-3,19	25,34	6,06
40	3,81	31,34	22,26	5,36	33,56	19,41	7,26	36,27	19,31	-1,23	24,14	6,90

Continúa...

#	Antena en 9			Antena en 10			Antena en 11			Antena en 12		
	DN	DP	PR	DN	DP	PR	DN	DP	PR	DN	DP	PR
1	-5,97	20,57	9,40	-6,19	20,26	7,82	-6,00	20,53	9,13	-0,56	28,30	7,09
2	-3,61	24,34	6,76	-3,83	24,03	5,18	-3,64	24,30	6,49	1,80	32,07	4,45
3	-1,85	26,06	5,56	-2,07	25,74	3,98	-1,88	26,01	5,29	3,56	33,79	3,25
4	-6,64	36,31	MA	-6,86	36,00	MA	-6,67	36,27	MA	-1,23	44,04	MA
5	-4,81	37,33	MA	-5,03	37,01	MA	-4,84	37,29	MA	0,60	45,06	MA
6	-6,36	33,81	MA	-6,58	33,50	MA	-6,39	33,77	MA	-0,95	41,54	MA
7	-8,26	32,90	MA	-8,48	32,59	MA	-8,29	32,86	MA	-2,85	40,63	MA
8	0,23	24,13	6,91	0,01	23,81	5,33	0,20	24,09	6,64	5,64	31,86	4,60
9	0,00	23,80	7,14	-0,22	23,49	5,56	-0,03	23,76	6,87	5,41	31,53	4,83
10	0,22	22,31	8,18	0,00	22,00	6,60	0,19	22,27	7,91	5,63	30,04	5,87
11	0,03	23,54	7,32	-0,19	23,23	5,74	0,00	23,50	7,05	5,44	31,27	5,01
12	-5,41	19,17	10,38	-5,63	18,86	8,80	-5,44	19,13	10,11	0,00	26,90	8,07
13	-5,19	19,79	9,95	-5,41	19,47	8,37	-5,22	19,74	9,68	0,22	27,51	7,64
14	-2,91	24,14	6,90	-3,13	23,83	5,32	-2,94	24,10	6,63	2,50	31,87	4,59
15	-1,57	22,66	7,94	-1,79	22,34	6,36	-1,60	22,61	7,67	3,84	30,39	5,63
16	-1,17	23,63	7,26	-1,39	23,31	5,68	-1,20	23,59	6,99	4,24	31,36	4,95
17	-0,78	25,09	6,24	-1,00	24,77	4,66	-0,81	25,04	5,97	4,63	32,81	3,93
18	-8,15	30,16	MA	-8,37	29,84	MA	-8,18	30,11	MA	-2,74	37,89	MA
19	-3,68	29,54	3,12	-3,90	29,23	MA	-3,71	29,50	MA	1,73	37,27	MA
20	-2,65	29,01	3,49	-2,87	28,70	MA	-2,68	28,97	3,22	2,76	36,74	MA
21	-3,32	30,26	MA	-3,54	29,94	MA	-3,35	30,21	MA	2,09	37,99	MA
22	-1,21	29,97	MA	-1,43	29,66	MA	-1,24	29,93	MA	4,20	37,70	MA
23	-4,56	26,49	5,26	-4,78	26,17	3,68	-4,59	26,44	4,99	0,85	34,21	MA
24	-1,59	28,23	4,04	-1,81	27,91	MA	-1,62	28,19	3,77	3,82	35,96	MA
25	-3,27	27,03	4,88	-3,49	26,71	3,30	-3,30	26,99	4,61	2,14	34,76	MA
26	-2,00	27,64	4,45	-2,22	27,33	MA	-2,03	27,60	4,18	3,41	35,37	MA
27	-3,06	29,73	MA	-3,28	29,41	MA	-3,09	29,69	MA	2,35	37,46	MA
28	-2,70	29,44	3,19	-2,92	29,13	MA	-2,73	29,40	MA	2,71	37,17	MA
29	-2,95	28,79	3,65	-3,17	28,47	MA	-2,98	28,74	3,38	2,46	36,51	MA
30	0,03	27,24	4,73	-0,19	26,93	3,15	0,00	27,20	4,46	5,44	34,97	MA
31	-3,22	24,70	6,51	-3,44	24,39	4,93	-3,25	24,66	6,24	2,19	32,43	4,20
32	-4,30	21,66	8,64	-4,52	21,34	7,06	-4,33	21,61	8,37	1,11	29,39	6,33
33	-2,38	26,70	5,11	-2,60	26,39	3,53	-2,41	26,66	4,84	3,03	34,43	MA
34	-0,32	27,14	4,80	-0,54	26,83	3,22	-0,35	27,10	4,53	5,09	34,87	MA
35	-3,35	24,41	6,71	-3,57	24,10	5,13	-3,38	24,37	6,44	2,06	32,14	4,40
36	-0,96	22,93	7,75	-1,18	22,61	6,17	-0,99	22,89	7,48	4,45	30,66	5,44
37	-0,92	24,39	6,73	-1,14	24,07	5,15	-0,95	24,34	6,46	4,49	32,11	4,42
38	-5,45	24,81	6,43	-5,67	24,50	4,85	-5,48	24,77	6,16	-0,04	32,54	4,12
39	-2,96	25,67	5,83	-3,18	25,36	4,25	-2,99	25,63	5,56	2,45	33,40	3,52
40	-1,00	24,47	6,67	-1,22	24,16	5,09	-1,03	24,43	6,40	4,41	32,20	4,36

Continúa...

#	Antena en 13			Antena en 14			Antena en 15			Antena en 16		
	DN	DP	PR	DN	DP	PR	DN	DP	PR	DN	DP	PR
1	-0,78	27,99	7,61	-3,06	24,73	10,99	-4,40	22,81	8,93	-4,80	22,24	9,73
2	1,58	31,76	4,97	-0,70	28,50	8,35	-2,04	26,59	6,29	-2,44	26,01	7,09
3	3,34	33,47	3,77	1,06	30,21	7,15	-0,28	28,30	5,09	-0,68	27,73	5,89
4	-1,45	43,73	MA	-3,73	40,47	MA	-5,07	38,56	MA	-5,47	37,99	MA
5	0,38	44,74	MA	-1,90	41,49	MA	-3,24	39,57	MA	-3,64	39,00	MA
6	-1,17	41,23	MA	-3,45	37,97	MA	-4,79	36,06	MA	-5,19	35,49	MA
7	-3,07	40,31	MA	-5,35	37,06	MA	-6,69	35,14	MA	-7,09	34,57	MA
8	5,42	31,54	5,12	3,14	28,29	8,50	1,80	26,37	6,44	1,40	25,80	7,24
9	5,19	31,21	5,35	2,91	27,96	8,73	1,57	26,04	6,67	1,17	25,47	7,47
10	5,41	29,73	6,39	3,13	26,47	9,77	1,79	24,56	7,71	1,39	23,99	8,51
11	5,22	30,96	5,53	2,94	27,70	8,91	1,60	25,79	6,85	1,20	25,21	7,65
12	-0,22	26,59	8,59	-2,50	23,33	11,97	-3,84	21,41	9,91	-4,24	20,84	10,71
13	0,00	27,20	8,16	-2,28	23,94	11,54	-3,62	22,03	9,48	-4,02	21,46	10,28
14	2,28	31,56	5,11	0,00	28,30	8,49	-1,34	26,39	6,43	-1,74	25,81	7,23
15	3,62	30,07	6,15	1,34	26,81	9,53	0,00	24,90	7,47	-0,40	24,33	8,27
16	4,02	31,04	5,47	1,74	27,79	8,85	0,40	25,87	6,79	0,00	25,30	7,59
17	4,41	32,50	4,45	2,13	29,24	7,83	0,79	27,33	5,77	0,39	26,76	6,57
18	-2,96	37,57	MA	-5,24	34,31	4,28	-6,58	32,40	MA	-6,98	31,83	3,02
19	1,51	36,96	MA	-0,77	33,70	4,71	-2,11	31,79	MA	-2,51	31,21	3,45
20	2,54	36,43	MA	0,26	33,17	5,08	-1,08	31,26	3,02	-1,48	30,69	3,82
21	1,87	37,67	MA	-0,41	34,41	4,21	-1,75	32,50	MA	-2,15	31,93	MA
22	3,98	37,39	MA	1,70	34,13	4,41	0,36	32,21	MA	-0,04	31,64	3,15
23	0,63	33,90	3,47	-1,65	30,64	6,85	-2,99	28,73	4,79	-3,39	28,16	5,59
24	3,60	35,64	MA	1,32	32,39	5,63	-0,02	30,47	3,57	-0,42	29,90	4,37
25	1,92	34,44	3,09	-0,36	31,19	6,47	-1,70	29,27	4,41	-2,10	28,70	5,21
26	3,19	35,06	MA	0,91	31,80	6,04	-0,43	29,89	3,98	-0,83	29,31	4,78
27	2,13	37,14	MA	-0,15	33,89	4,58	-1,49	31,97	MA	-1,89	31,40	3,32
28	2,49	36,86	MA	0,21	33,60	4,78	-1,13	31,69	MA	-1,53	31,11	3,52
29	2,24	36,20	MA	-0,04	32,94	5,24	-1,38	31,03	3,18	-1,78	30,46	3,98
30	5,22	34,66	MA	2,94	31,40	6,32	1,60	29,49	4,26	1,20	28,91	5,06
31	1,97	32,11	4,72	-0,31	28,86	8,10	-1,65	26,94	6,04	-2,05	26,37	6,84
32	0,89	29,07	6,85	-1,39	25,81	10,23	-2,73	23,90	8,17	-3,13	23,33	8,97
33	2,81	34,11	3,32	0,53	30,86	6,70	-0,81	28,94	4,64	-1,21	28,37	5,44
34	4,87	34,56	3,01	2,59	31,30	6,39	1,25	29,39	4,33	0,85	28,81	5,13
35	1,84	31,83	4,92	-0,44	28,57	8,30	-1,78	26,66	6,24	-2,18	26,09	7,04
36	4,23	30,34	5,96	1,95	27,09	9,34	0,61	25,17	7,28	0,21	24,60	8,08
37	4,27	31,80	4,94	1,99	28,54	8,32	0,65	26,63	6,26	0,25	26,06	7,06
38	-0,26	32,23	4,64	-2,54	28,97	8,02	-3,88	27,06	5,96	-4,28	26,49	6,76
39	2,23	33,09	4,04	-0,05	29,83	7,42	-1,39	27,91	5,36	-1,79	27,34	6,16
40	4,19	31,89	4,88	1,91	28,63	8,26	0,57	26,71	6,20	0,17	26,14	7,00

Continúa...

#	Antena en 17			Antena en 18			Antena en 19			Antena en 20		
	DN	DP	PR									
1	-5,19	21,69	11,02	2,18	32,21	19,25	-2,29	25,83	16,72	-3,32	24,36	15,75
2	-2,83	25,46	8,38	4,54	35,99	16,61	0,07	29,60	14,08	-0,96	28,13	13,11
3	-1,07	27,17	7,18	6,30	37,70	15,41	1,83	31,31	12,88	0,80	29,84	11,91
4	-5,86	37,43	MA	1,51	47,96	8,23	-2,96	41,57	5,70	-3,99	40,10	4,73
5	-4,03	38,44	MA	3,34	48,97	7,52	-1,13	42,59	4,99	-2,16	41,11	4,02
6	-5,58	34,93	MA	1,79	45,46	9,98	-2,68	39,07	7,45	-3,71	37,60	6,48
7	-7,48	34,01	MA	-0,11	44,54	10,62	-4,58	38,16	8,09	-5,61	36,69	7,12
8	1,01	25,24	8,53	8,38	35,77	16,76	3,91	29,39	14,23	2,88	27,91	13,26
9	0,78	24,91	8,76	8,15	35,44	16,99	3,68	29,06	14,46	2,65	27,59	13,49
10	1,00	23,43	9,80	8,37	33,96	18,03	3,90	27,57	15,50	2,87	26,10	14,53
11	0,81	24,66	8,94	8,18	35,19	17,17	3,71	28,80	14,64	2,68	27,33	13,67
12	-4,63	20,29	12,00	2,74	30,81	20,23	-1,73	24,43	17,70	-2,76	22,96	16,73
13	-4,41	20,90	11,57	2,96	31,43	19,80	-1,51	25,04	17,27	-2,54	23,57	16,30
14	-2,13	25,26	8,52	5,24	35,79	16,75	0,77	29,40	14,22	-0,26	27,93	13,25
15	-0,79	23,77	9,56	6,58	34,30	17,79	2,11	27,91	15,26	1,08	26,44	14,29
16	-0,39	24,74	8,88	6,98	35,27	17,11	2,51	28,89	14,58	1,48	27,41	13,61
17	0,00	26,20	7,86	7,37	36,73	16,09	2,90	30,34	13,56	1,87	28,87	12,59
18	-7,37	31,27	4,31	0,00	41,80	12,54	-4,47	35,41	10,01	-5,50	33,94	9,04
19	-2,90	30,66	4,74	4,47	41,19	12,97	0,00	34,80	10,44	-1,03	33,33	9,47
20	-1,87	30,13	5,11	5,50	40,66	13,34	1,03	34,27	10,81	0,00	32,80	9,84
21	-2,54	31,37	4,24	4,83	41,90	12,47	0,36	35,51	9,94	-0,67	34,04	8,97
22	-0,43	31,09	4,44	6,94	41,61	12,67	2,47	35,23	10,14	1,44	33,76	9,17
23	-3,78	27,60	6,88	3,59	38,13	15,11	-0,88	31,74	12,58	-1,91	30,27	11,61
24	-0,81	29,34	5,66	6,56	39,87	13,89	2,09	33,49	11,36	1,06	32,01	10,39
25	-2,49	28,14	6,50	4,88	38,67	14,73	0,41	32,29	12,20	-0,62	30,81	11,23
26	-1,22	28,76	6,07	6,15	39,29	14,30	1,68	32,90	11,77	0,65	31,43	10,80
27	-2,28	30,84	4,61	5,09	41,37	12,84	0,62	34,99	10,31	-0,41	33,51	9,34
28	-1,92	30,56	4,81	5,45	41,09	13,04	0,98	34,70	10,51	-0,05	33,23	9,54
29	-2,17	29,90	5,27	5,20	40,43	13,50	0,73	34,04	10,97	-0,30	32,57	10,00
30	0,81	28,36	6,35	8,18	38,89	14,58	3,71	32,50	12,05	2,68	31,03	11,08
31	-2,44	25,81	8,13	4,93	36,34	16,36	0,46	29,96	13,83	-0,57	28,49	12,86
32	-3,52	22,77	10,26	3,85	33,30	18,49	-0,62	26,91	15,96	-1,65	25,44	14,99
33	-1,60	27,81	6,73	5,77	38,34	14,96	1,30	31,96	12,43	0,27	30,49	11,46
34	0,46	28,26	6,42	7,83	38,79	14,65	3,36	32,40	12,12	2,33	30,93	11,15
35	-2,57	25,53	8,33	4,80	36,06	16,56	0,33	29,67	14,03	-0,70	28,20	13,06
36	-0,18	24,04	9,37	7,19	34,57	17,60	2,72	28,19	15,07	1,69	26,71	14,10
37	-0,14	25,50	8,35	7,23	36,03	16,58	2,76	29,64	14,05	1,73	28,17	13,08
38	-4,67	25,93	8,05	2,70	36,46	16,28	-1,77	30,07	13,75	-2,80	28,60	12,78
39	-2,18	26,79	7,45	5,19	37,31	15,68	0,72	30,93	13,15	-0,31	29,46	12,18
40	-0,22	25,59	8,29	7,15	36,11	16,52	2,68	29,73	13,99	1,65	28,26	13,02

Continúa...

#	Antena en 21			Antena en 22			Antena en 23			Antena en 24		
	DN	DP	PR									
1	-2,65	25,31	17,28	-4,76	22,30	16,09	-1,41	27,09	14,04	-4,38	22,84	14,51
2	-0,29	29,09	14,64	-2,40	26,07	13,45	0,95	30,86	11,40	-2,02	26,61	11,87
3	1,47	30,80	13,44	-0,64	27,79	12,25	2,71	32,57	10,20	-0,26	28,33	10,67
4	-3,32	41,06	6,26	-5,43	38,04	5,07	-2,08	42,83	3,02	-5,05	38,59	3,49
5	-1,49	42,07	5,55	-3,60	39,06	4,36	-0,25	43,84	MA	-3,22	39,60	MA
6	-3,04	38,56	8,01	-5,15	35,54	6,82	-1,80	40,33	4,77	-4,77	36,09	5,24
7	-4,94	37,64	8,65	-7,05	34,63	7,46	-3,70	39,41	5,41	-6,67	35,17	5,88
8	3,55	28,87	14,79	1,44	25,86	13,60	4,79	30,64	11,55	1,82	26,40	12,02
9	3,32	28,54	15,02	1,21	25,53	13,83	4,56	30,31	11,78	1,59	26,07	12,25
10	3,54	27,06	16,06	1,43	24,04	14,87	4,78	28,83	12,82	1,81	24,59	13,29
11	3,35	28,29	15,20	1,24	25,27	14,01	4,59	30,06	11,96	1,62	25,81	12,43
12	-2,09	23,91	18,26	-4,20	20,90	17,07	-0,85	25,69	15,02	-3,82	21,44	15,49
13	-1,87	24,53	17,83	-3,98	21,51	16,64	-0,63	26,30	14,59	-3,60	22,06	15,06
14	0,41	28,89	14,78	-1,70	25,87	13,59	1,65	30,66	11,54	-1,32	26,41	12,01
15	1,75	27,40	15,82	-0,36	24,39	14,63	2,99	29,17	12,58	0,02	24,93	13,05
16	2,15	28,37	15,14	0,04	25,36	13,95	3,39	30,14	11,90	0,42	25,90	12,37
17	2,54	29,83	14,12	0,43	26,81	12,93	3,78	31,60	10,88	0,81	27,36	11,35
18	-4,83	34,90	10,57	-6,94	31,89	9,38	-3,59	36,67	7,33	-6,56	32,43	7,80
19	-0,36	34,29	11,00	-2,47	31,27	9,81	0,88	36,06	7,76	-2,09	31,81	8,23
20	0,67	33,76	11,37	-1,44	30,74	10,18	1,91	35,53	8,13	-1,06	31,29	8,60
21	0,00	35,00	10,50	-2,11	31,99	9,31	1,24	36,77	7,26	-1,73	32,53	7,73
22	2,11	34,71	10,70	0,00	31,70	9,51	3,35	36,49	7,46	0,38	32,24	7,93
23	-1,24	31,23	13,14	-3,35	28,21	11,95	0,00	33,00	9,90	-2,97	28,76	10,37
24	1,73	32,97	11,92	-0,38	29,96	10,73	2,97	34,74	8,68	0,00	30,50	9,15
25	0,05	31,77	12,76	-2,06	28,76	11,57	1,29	33,54	9,52	-1,68	29,30	9,99
26	1,32	32,39	12,33	-0,79	29,37	11,14	2,56	34,16	9,09	-0,41	29,91	9,56
27	0,26	34,47	10,87	-1,85	31,46	9,68	1,50	36,24	7,63	-1,47	32,00	8,10
28	0,62	34,19	11,07	-1,49	31,17	9,88	1,86	35,96	7,83	-1,11	31,71	8,30
29	0,37	33,53	11,53	-1,74	30,51	10,34	1,61	35,30	8,29	-1,36	31,06	8,76
30	3,35	31,99	12,61	1,24	28,97	11,42	4,59	33,76	9,37	1,62	29,51	9,84
31	0,10	29,44	14,39	-2,01	26,43	13,20	1,34	31,21	11,15	-1,63	26,97	11,62
32	-0,98	26,40	16,52	-3,09	23,39	15,33	0,26	28,17	13,28	-2,71	23,93	13,75
33	0,94	31,44	12,99	-1,17	28,43	11,80	2,18	33,21	9,75	-0,79	28,97	10,22
34	3,00	31,89	12,68	0,89	28,87	11,49	4,24	33,66	9,44	1,27	29,41	9,91
35	-0,03	29,16	14,59	-2,14	26,14	13,40	1,21	30,93	11,35	-1,76	26,69	11,82
36	2,36	27,67	15,63	0,25	24,66	14,44	3,60	29,44	12,39	0,63	25,20	12,86
37	2,40	29,13	14,61	0,29	26,11	13,42	3,64	30,90	11,37	0,67	26,66	11,84
38	-2,13	29,56	14,31	-4,24	26,54	13,12	-0,89	31,33	11,07	-3,86	27,09	11,54
39	0,36	30,41	13,71	-1,75	27,40	12,52	1,60	32,19	10,47	-1,37	27,94	10,94
40	2,32	29,21	14,55	0,21	26,20	13,36	3,56	30,99	11,31	0,59	26,74	11,78

Continúa...

#	Antena en 25			Antena en 26			Antena en 27			Antena en 28		
	DN	DP	PR									
1	-2,70	25,24	14,03	-3,97	23,43	14,10	-2,91	24,94	16,64	-3,27	24,43	16,20
2	-0,34	29,01	11,39	-1,61	27,20	11,46	-0,55	28,71	14,00	-0,91	28,20	13,56
3	1,42	30,73	10,19	0,15	28,91	10,26	1,21	30,43	12,80	0,85	29,91	12,36
4	-3,37	40,99	3,01	-4,64	39,17	3,08	-3,58	40,69	5,62	-3,94	40,17	5,18
5	-1,54	42,00	MA	-2,81	40,19	MA	-1,75	41,70	4,91	-2,11	41,19	4,47
6	-3,09	38,49	4,76	-4,36	36,67	4,83	-3,30	38,19	7,37	-3,66	37,67	6,93
7	-4,99	37,57	5,40	-6,26	35,76	5,47	-5,20	37,27	8,01	-5,56	36,76	7,57
8	3,50	28,80	11,54	2,23	26,99	11,61	3,29	28,50	14,15	2,93	27,99	13,71
9	3,27	28,47	11,77	2,00	26,66	11,84	3,06	28,17	14,38	2,70	27,66	13,94
10	3,49	26,99	12,81	2,22	25,17	12,88	3,28	26,69	15,42	2,92	26,17	14,98
11	3,30	28,21	11,95	2,03	26,40	12,02	3,09	27,91	14,56	2,73	27,40	14,12
12	-2,14	23,84	15,01	-3,41	22,03	15,08	-2,35	23,54	17,62	-2,71	23,03	17,18
13	-1,92	24,46	14,58	-3,19	22,64	14,65	-2,13	24,16	17,19	-2,49	23,64	16,75
14	0,36	28,81	11,53	-0,91	27,00	11,60	0,15	28,51	14,14	-0,21	28,00	13,70
15	1,70	27,33	12,57	0,43	25,51	12,64	1,49	27,03	15,18	1,13	26,51	14,74
16	2,10	28,30	11,89	0,83	26,49	11,96	1,89	28,00	14,50	1,53	27,49	14,06
17	2,49	29,76	10,87	1,22	27,94	10,94	2,28	29,46	13,48	1,92	28,94	13,04
18	-4,88	34,83	7,32	-6,15	33,01	7,39	-5,09	34,53	9,93	-5,45	34,01	9,49
19	-0,41	34,21	7,75	-1,68	32,40	7,82	-0,62	33,91	10,36	-0,98	33,40	9,92
20	0,62	33,69	8,12	-0,65	31,87	8,19	0,41	33,39	10,73	0,05	32,87	10,29
21	-0,05	34,93	7,25	-1,32	33,11	7,32	-0,26	34,63	9,86	-0,62	34,11	9,42
22	2,06	34,64	7,45	0,79	32,83	7,52	1,85	34,34	10,06	1,49	33,83	9,62
23	-1,29	31,16	9,89	-2,56	29,34	9,96	-1,50	30,86	12,50	-1,86	30,34	12,06
24	1,68	32,90	8,67	0,41	31,09	8,74	1,47	32,60	11,28	1,11	32,09	10,84
25	0,00	31,70	9,51	-1,27	29,89	9,58	-0,21	31,40	12,12	-0,57	30,89	11,68
26	1,27	32,31	9,08	0,00	30,50	9,15	1,06	32,01	11,69	0,70	31,50	11,25
27	0,21	34,40	7,62	-1,06	32,59	7,69	0,00	34,10	10,23	-0,36	33,59	9,79
28	0,57	34,11	7,82	-0,70	32,30	7,89	0,36	33,81	10,43	0,00	33,30	9,99
29	0,32	33,46	8,28	-0,95	31,64	8,35	0,11	33,16	10,89	-0,25	32,64	10,45
30	3,30	31,91	9,36	2,03	30,10	9,43	3,09	31,61	11,97	2,73	31,10	11,53
31	0,05	29,37	11,14	-1,22	27,56	11,21	-0,16	29,07	13,75	-0,52	28,56	13,31
32	-1,03	26,33	13,27	-2,30	24,51	13,34	-1,24	26,03	15,88	-1,60	25,51	15,44
33	0,89	31,37	9,74	-0,38	29,56	9,81	0,68	31,07	12,35	0,32	30,56	11,91
34	2,95	31,81	9,43	1,68	30,00	9,50	2,74	31,51	12,04	2,38	31,00	11,60
35	-0,08	29,09	11,34	-1,35	27,27	11,41	-0,29	28,79	13,95	-0,65	28,27	13,51
36	2,31	27,60	12,38	1,04	25,79	12,45	2,10	27,30	14,99	1,74	26,79	14,55
37	2,35	29,06	11,36	1,08	27,24	11,43	2,14	28,76	13,97	1,78	28,24	13,53
38	-2,18	29,49	11,06	-3,45	27,67	11,13	-2,39	29,19	13,67	-2,75	28,67	13,23
39	0,31	30,34	10,46	-0,96	28,53	10,53	0,10	30,04	13,07	-0,26	29,53	12,63
40	2,27	29,14	11,30	1,00	27,33	11,37	2,06	28,84	13,91	1,70	28,33	13,47

Continúa...

#	Antena en 29			Antena en 30			Antena en 31			Antena en 32		
	DN	DP	PR									
1	-3,02	24,79	15,65	-6,00	20,53	12,83	-2,75	25,17	11,68	-1,67	26,71	9,10
2	-0,66	28,56	13,01	-3,64	24,30	10,19	-0,39	28,94	9,04	0,69	30,49	6,46
3	1,10	30,27	11,81	-1,88	26,01	8,99	1,37	30,66	7,84	2,45	32,20	5,26
4	-3,69	40,53	4,63	-6,67	36,27	MA	-3,42	40,91	MA	-2,34	42,46	MA
5	-1,86	41,54	3,92	-4,84	37,29	MA	-1,59	41,93	MA	-0,51	43,47	MA
6	-3,41	38,03	6,38	-6,39	33,77	3,56	-3,14	38,41	MA	-2,06	39,96	MA
7	-5,31	37,11	7,02	-8,29	32,86	4,20	-5,04	37,50	3,05	-3,96	39,04	MA
8	3,18	28,34	13,16	0,20	24,09	10,34	3,45	28,73	9,19	4,53	30,27	6,61
9	2,95	28,01	13,39	-0,03	23,76	10,57	3,22	28,40	9,42	4,30	29,94	6,84
10	3,17	26,53	14,43	0,19	22,27	11,61	3,44	26,91	10,46	4,52	28,46	7,88
11	2,98	27,76	13,57	0,00	23,50	10,75	3,25	28,14	9,60	4,33	29,69	7,02
12	-2,46	23,39	16,63	-5,44	19,13	13,81	-2,19	23,77	12,66	-1,11	25,31	10,08
13	-2,24	24,00	16,20	-5,22	19,74	13,38	-1,97	24,39	12,23	-0,89	25,93	9,65
14	0,04	28,36	13,15	-2,94	24,10	10,33	0,31	28,74	9,18	1,39	30,29	6,60
15	1,38	26,87	14,19	-1,60	22,61	11,37	1,65	27,26	10,22	2,73	28,80	7,64
16	1,78	27,84	13,51	-1,20	23,59	10,69	2,05	28,23	9,54	3,13	29,77	6,96
17	2,17	29,30	12,49	-0,81	25,04	9,67	2,44	29,69	8,52	3,52	31,23	5,94
18	-5,20	34,37	8,94	-8,18	30,11	6,12	-4,93	34,76	4,97	-3,85	36,30	MA
19	-0,73	33,76	9,37	-3,71	29,50	6,55	-0,46	34,14	5,40	0,62	35,69	MA
20	0,30	33,23	9,74	-2,68	28,97	6,92	0,57	33,61	5,77	1,65	35,16	3,19
21	-0,37	34,47	8,87	-3,35	30,21	6,05	-0,10	34,86	4,90	0,98	36,40	MA
22	1,74	34,19	9,07	-1,24	29,93	6,25	2,01	34,57	5,10	3,09	36,11	MA
23	-1,61	30,70	11,51	-4,59	26,44	8,69	-1,34	31,09	7,54	-0,26	32,63	4,96
24	1,36	32,44	10,29	-1,62	28,19	7,47	1,63	32,83	6,32	2,71	34,37	3,74
25	-0,32	31,24	11,13	-3,30	26,99	8,31	-0,05	31,63	7,16	1,03	33,17	4,58
26	0,95	31,86	10,70	-2,03	27,60	7,88	1,22	32,24	6,73	2,30	33,79	4,15
27	-0,11	33,94	9,24	-3,09	29,69	6,42	0,16	34,33	5,27	1,24	35,87	MA
28	0,25	33,66	9,44	-2,73	29,40	6,62	0,52	34,04	5,47	1,60	35,59	MA
29	0,00	33,00	9,90	-2,98	28,74	7,08	0,27	33,39	5,93	1,35	34,93	3,35
30	2,98	31,46	10,98	0,00	27,20	8,16	3,25	31,84	7,01	4,33	33,39	4,43
31	-0,27	28,91	12,76	-3,25	24,66	9,94	0,00	29,30	8,79	1,08	30,84	6,21
32	-1,35	25,87	14,89	-4,33	21,61	12,07	-1,08	26,26	10,92	0,00	27,80	8,34
33	0,57	30,91	11,36	-2,41	26,66	8,54	0,84	31,30	7,39	1,92	32,84	4,81
34	2,63	31,36	11,05	-0,35	27,10	8,23	2,90	31,74	7,08	3,98	33,29	4,50
35	-0,40	28,63	12,96	-3,38	24,37	10,14	-0,13	29,01	8,99	0,95	30,56	6,41
36	1,99	27,14	14,00	-0,99	22,89	11,18	2,26	27,53	10,03	3,34	29,07	7,45
37	2,03	28,60	12,98	-0,95	24,34	10,16	2,30	28,99	9,01	3,38	30,53	6,43
38	-2,50	29,03	12,68	-5,48	24,77	9,86	-2,23	29,41	8,71	-1,15	30,96	6,13
39	-0,01	29,89	12,08	-2,99	25,63	9,26	0,26	30,27	8,11	1,34	31,81	5,53
40	1,95	28,69	12,92	-1,03	24,43	10,10	2,22	29,07	8,95	3,30	30,61	6,37

Continúa...

#	Antena en 33			Antena en 34			Antena en 35			Antena en 36		
	DN	DP	PR	DN	DP	PR	DN	DP	PR	DN	DP	PR
1	-3,59	23,97	13,32	-5,65	21,03	12,88	-2,62	25,36	11,45	-5,01	21,94	8,94
2	-1,23	27,74	10,68	-3,29	24,80	10,24	-0,26	29,13	8,81	-2,65	25,71	6,30
3	0,53	29,46	9,48	-1,53	26,51	9,04	1,50	30,84	7,61	-0,89	27,43	5,10
4	-4,26	39,71	MA	-6,32	36,77	MA	-3,29	41,10	MA	-5,68	37,69	MA
5	-2,43	40,73	MA	-4,49	37,79	MA	-1,46	42,11	MA	-3,85	38,70	MA
6	-3,98	37,21	4,05	-6,04	34,27	3,61	-3,01	38,60	MA	-5,40	35,19	MA
7	-5,88	36,30	4,69	-7,94	33,36	4,25	-4,91	37,69	MA	-7,30	34,27	MA
8	2,61	27,53	10,83	0,55	24,59	10,39	3,58	28,91	8,96	1,19	25,50	6,45
9	2,38	27,20	11,06	0,32	24,26	10,62	3,35	28,59	9,19	0,96	25,17	6,68
10	2,60	25,71	12,10	0,54	22,77	11,66	3,57	27,10	10,23	1,18	23,69	7,72
11	2,41	26,94	11,24	0,35	24,00	10,80	3,38	28,33	9,37	0,99	24,91	6,86
12	-3,03	22,57	14,30	-5,09	19,63	13,86	-2,06	23,96	12,43	-4,45	20,54	9,92
13	-2,81	23,19	13,87	-4,87	20,24	13,43	-1,84	24,57	12,00	-4,23	21,16	9,49
14	-0,53	27,54	10,82	-2,59	24,60	10,38	0,44	28,93	8,95	-1,95	25,51	6,44
15	0,81	26,06	11,86	-1,25	23,11	11,42	1,78	27,44	9,99	-0,61	24,03	7,48
16	1,21	27,03	11,18	-0,85	24,09	10,74	2,18	28,41	9,31	-0,21	25,00	6,80
17	1,60	28,49	10,16	-0,46	25,54	9,72	2,57	29,87	8,29	0,18	26,46	5,78
18	-5,77	33,56	6,61	-7,83	30,61	6,17	-4,80	34,94	4,74	-7,19	31,53	MA
19	-1,30	32,94	7,04	-3,36	30,00	6,60	-0,33	34,33	5,17	-2,72	30,91	MA
20	-0,27	32,41	7,41	-2,33	29,47	6,97	0,70	33,80	5,54	-1,69	30,39	3,03
21	-0,94	33,66	6,54	-3,00	30,71	6,10	0,03	35,04	4,67	-2,36	31,63	MA
22	1,17	33,37	6,74	-0,89	30,43	6,30	2,14	34,76	4,87	-0,25	31,34	MA
23	-2,18	29,89	9,18	-4,24	26,94	8,74	-1,21	31,27	7,31	-3,60	27,86	4,80
24	0,79	31,63	7,96	-1,27	28,69	7,52	1,76	33,01	6,09	-0,63	29,60	3,58
25	-0,89	30,43	8,80	-2,95	27,49	8,36	0,08	31,81	6,93	-2,31	28,40	4,42
26	0,38	31,04	8,37	-1,68	28,10	7,93	1,35	32,43	6,50	-1,04	29,01	3,99
27	-0,68	33,13	6,91	-2,74	30,19	6,47	0,29	34,51	5,04	-2,10	31,10	MA
28	-0,32	32,84	7,11	-2,38	29,90	6,67	0,65	34,23	5,24	-1,74	30,81	MA
29	-0,57	32,19	7,57	-2,63	29,24	7,13	0,40	33,57	5,70	-1,99	30,16	3,19
30	2,41	30,64	8,65	0,35	27,70	8,21	3,38	32,03	6,78	0,99	28,61	4,27
31	-0,84	28,10	10,43	-2,90	25,16	9,99	0,13	29,49	8,56	-2,26	26,07	6,05
32	-1,92	25,06	12,56	-3,98	22,11	12,12	-0,95	26,44	10,69	-3,34	23,03	8,18
33	0,00	30,10	9,03	-2,06	27,16	8,59	0,97	31,49	7,16	-1,42	28,07	4,65
34	2,06	30,54	8,72	0,00	27,60	8,28	3,03	31,93	6,85	0,64	28,51	4,34
35	-0,97	27,81	10,63	-3,03	24,87	10,19	0,00	29,20	8,76	-2,39	25,79	6,25
36	1,42	26,33	11,67	-0,64	23,39	11,23	2,39	27,71	9,80	0,00	24,30	7,29
37	1,46	27,79	10,65	-0,60	24,84	10,21	2,43	29,17	8,78	0,04	25,76	6,27
38	-3,07	28,21	10,35	-5,13	25,27	9,91	-2,10	29,60	8,48	-4,49	26,19	5,97
39	-0,58	29,07	9,75	-2,64	26,13	9,31	0,39	30,46	7,88	-2,00	27,04	5,37
40	1,38	27,87	10,59	-0,68	24,93	10,15	2,35	29,26	8,72	-0,04	25,84	6,21

Continúa...

V#	Antena en 37			Antena en 38			Antena en 39			Antena en 40		
	DN	DP	PR									
1	-5,05	21,89	10,38	-0,52	28,36	12,75	-3,01	24,80	12,54	-4,97	22,00	10,50
2	-2,69	25,66	7,74	1,84	32,13	10,11	-0,65	28,57	9,90	-2,61	25,77	7,86
3	-0,93	27,37	6,54	3,60	33,84	8,91	1,11	30,29	8,70	-0,85	27,49	6,66
4	-5,72	37,63	MA	-1,19	44,10	MA	-3,68	40,54	MA	-5,64	37,74	MA
5	-3,89	38,64	MA	0,64	45,11	MA	-1,85	41,56	MA	-3,81	38,76	MA
6	-5,44	35,13	MA	-0,91	41,60	3,48	-3,40	38,04	3,27	-5,36	35,24	MA
7	-7,34	34,21	MA	-2,81	40,69	4,12	-5,30	37,13	3,91	-7,26	34,33	MA
8	1,15	25,44	7,89	5,68	31,91	10,26	3,19	28,36	10,05	1,23	25,56	8,01
9	0,92	25,11	8,12	5,45	31,59	10,49	2,96	28,03	10,28	1,00	25,23	8,24
10	1,14	23,63	9,16	5,67	30,10	11,53	3,18	26,54	11,32	1,22	23,74	9,28
11	0,95	24,86	8,30	5,48	31,33	10,67	2,99	27,77	10,46	1,03	24,97	8,42
12	-4,49	20,49	11,36	0,04	26,96	13,73	-2,45	23,40	13,52	-4,41	20,60	11,48
13	-4,27	21,10	10,93	0,26	27,57	13,30	-2,23	24,01	13,09	-4,19	21,21	11,05
14	-1,99	25,46	7,88	2,54	31,93	10,25	0,05	28,37	10,04	-1,91	25,57	8,00
15	-0,65	23,97	8,92	3,88	30,44	11,29	1,39	26,89	11,08	-0,57	24,09	9,04
16	-0,25	24,94	8,24	4,28	31,41	10,61	1,79	27,86	10,40	-0,17	25,06	8,36
17	0,14	26,40	7,22	4,67	32,87	9,59	2,18	29,31	9,38	0,22	26,51	7,34
18	-7,23	31,47	3,67	-2,70	37,94	6,04	-5,19	34,39	5,83	-7,15	31,59	3,79
19	-2,76	30,86	4,10	1,77	37,33	6,47	-0,72	33,77	6,26	-2,68	30,97	4,22
20	-1,73	30,33	4,47	2,80	36,80	6,84	0,31	33,24	6,63	-1,65	30,44	4,59
21	-2,40	31,57	3,60	2,13	38,04	5,97	-0,36	34,49	5,76	-2,32	31,69	3,72
22	-0,29	31,29	3,80	4,24	37,76	6,17	1,75	34,20	5,96	-0,21	31,40	3,92
23	-3,64	27,80	6,24	0,89	34,27	8,61	-1,60	30,71	8,40	-3,56	27,91	6,36
24	-0,67	29,54	5,02	3,86	36,01	7,39	1,37	32,46	7,18	-0,59	29,66	5,14
25	-2,35	28,34	5,86	2,18	34,81	8,23	-0,31	31,26	8,02	-2,27	28,46	5,98
26	-1,08	28,96	5,43	3,45	35,43	7,80	0,96	31,87	7,59	-1,00	29,07	5,55
27	-2,14	31,04	3,97	2,39	37,51	6,34	-0,10	33,96	6,13	-2,06	31,16	4,09
28	-1,78	30,76	4,17	2,75	37,23	6,54	0,26	33,67	6,33	-1,70	30,87	4,29
29	-2,03	30,10	4,63	2,50	36,57	7,00	0,01	33,01	6,79	-1,95	30,21	4,75
30	0,95	28,56	5,71	5,48	35,03	8,08	2,99	31,47	7,87	1,03	28,67	5,83
31	-2,30	26,01	7,49	2,23	32,49	9,86	-0,26	28,93	9,65	-2,22	26,13	7,61
32	-3,38	22,97	9,62	1,15	29,44	11,99	-1,34	25,89	11,78	-3,30	23,09	9,74
33	-1,46	28,01	6,09	3,07	34,49	8,46	0,58	30,93	8,25	-1,38	28,13	6,21
34	0,60	28,46	5,78	5,13	34,93	8,15	2,64	31,37	7,94	0,68	28,57	5,90
35	-2,43	25,73	7,69	2,10	32,20	10,06	-0,39	28,64	9,85	-2,35	25,84	7,81
36	-0,04	24,24	8,73	4,49	30,71	11,10	2,00	27,16	10,89	0,04	24,36	8,85
37	0,00	25,70	7,71	4,53	32,17	10,08	2,04	28,61	9,87	0,08	25,81	7,83
38	-4,53	26,13	7,41	0,00	32,60	9,78	-2,49	29,04	9,57	-4,45	26,24	7,53
39	-2,04	26,99	6,81	2,49	33,46	9,18	0,00	29,90	8,97	-1,96	27,10	6,93
40	-0,08	25,79	7,65	4,45	32,26	10,02	1,96	28,70	9,81	0,00	25,90	7,77

Nota: DN: Desnivel, DP: Diferencia de presión, PR: Presión restante, MA: Menor al límite.

Anexo B: Separación entre nodos de la red.

Tabla 18. Tabla de atributos QNEAT3.

O-D	Origen en 1		Origen en 2		Origen en 3		Origen en 4		Origen en 5		Origen en 6		Origen en 7		Origen en 8	
	D (m)	O-D	D (m)	O-D												
1-1	0,00	2-1	179,04	3-1	327,68	4-1	2572,60	5-1	2596,71	6-1	2243,80	7-1	2234,92	8-1	3004,46	
1-2	179,04	2-2	0,00	3-2	157,59	4-2	2402,51	5-2	2426,62	6-2	2073,71	7-2	2064,83	8-2	2834,37	
1-3	327,68	2-3	157,59	3-3	0,00	4-3	2255,24	5-3	2279,34	6-3	1926,44	7-3	1917,55	8-3	2687,09	
1-4	2572,60	2-4	2402,51	3-4	2255,24	4-4	0,00	5-4	29,79	6-4	337,73	7-4	343,28	8-4	2578,11	
1-5	2596,71	2-5	2426,62	3-5	2279,34	4-5	29,79	5-5	0,00	6-5	361,84	7-5	367,38	8-5	2602,22	
1-6	2243,80	2-6	2073,71	3-6	1926,44	4-6	337,73	5-6	361,84	6-6	0,00	7-6	14,48	8-6	2249,31	
1-7	2234,92	2-7	2064,83	3-7	1917,55	4-7	343,28	5-7	367,38	6-7	14,48	7-7	0,00	8-7	2240,43	
1-8	3004,46	2-8	2834,37	3-8	2687,09	4-8	2578,11	5-8	2602,22	6-8	2249,31	7-8	2240,43	8-8	0,00	
1-9	2841,23	2-9	2671,14	3-9	2523,87	4-9	2414,89	5-9	2438,99	6-9	2086,09	7-9	2077,20	8-9	169,71	
1-10	3129,00	2-10	2958,91	3-10	2811,64	4-10	2702,66	5-10	2726,76	6-10	2373,86	7-10	2364,97	8-10	133,39	
1-11	2860,12	2-11	2690,03	3-11	2542,76	4-11	2433,78	5-11	2457,88	6-11	2104,98	7-11	2096,09	8-11	149,55	
1-12	3385,54	2-12	3215,45	3-12	3068,17	4-12	2959,19	5-12	2983,30	6-12	2630,39	7-12	2621,50	8-12	2105,76	
1-13	3359,44	2-13	3189,35	3-13	3042,07	4-13	2933,09	5-13	2957,20	6-13	2604,29	7-13	2595,41	8-13	2079,66	
1-14	3182,08	2-14	3011,99	3-14	2864,71	4-14	2755,73	5-14	2779,84	6-14	2426,93	7-14	2418,05	8-14	1902,30	
1-15	323,62	2-15	153,53	3-15	8,56	4-15	2253,48	5-15	2277,59	6-15	1924,68	7-15	1915,80	8-15	2685,34	
1-16	606,33	2-16	436,24	3-16	288,97	4-16	1968,15	5-16	1992,26	6-16	1639,35	7-16	1630,47	8-16	2400,01	
1-17	749,06	2-17	578,97	3-17	431,69	4-17	1830,11	5-17	1854,22	6-17	1501,31	7-17	1492,42	8-17	2261,96	
1-18	2049,62	2-18	1879,53	3-18	1732,25	4-18	528,68	5-18	552,78	6-18	199,88	7-18	190,99	8-18	2055,13	
1-19	1756,17	2-19	1586,08	3-19	1438,80	4-19	821,87	5-19	845,98	6-19	493,07	7-19	484,18	8-19	1761,67	
1-20	1587,96	2-20	1417,87	3-20	1270,60	4-20	990,47	5-20	1014,58	6-20	661,67	7-20	652,78	8-20	1593,47	
1-21	1827,12	2-21	1657,03	3-21	1509,75	4-21	750,78	5-21	774,89	6-21	421,98	7-21	413,09	8-21	1832,63	
1-22	1650,13	2-22	1480,04	3-22	1332,77	4-22	927,96	5-22	952,07	6-22	599,16	7-22	590,28	8-22	1655,64	
1-23	2623,24	2-23	2453,15	3-23	2305,87	4-23	2196,89	5-23	2221,00	6-23	1868,09	7-23	1859,20	8-23	389,70	
1-24	2189,54	2-24	2019,45	3-24	1872,17	4-24	1763,19	5-24	1787,30	6-24	1434,39	7-24	1425,51	8-24	817,03	
1-25	2651,40	2-25	2481,31	3-25	2334,03	4-25	2225,05	5-25	2249,16	6-25	1896,25	7-25	1887,36	8-25	356,76	
1-26	2942,42	2-26	2772,33	3-26	2625,05	4-26	2516,07	5-26	2540,18	6-26	2187,27	7-26	2178,39	8-26	1662,64	
1-27	1507,21	2-27	1337,12	3-27	1189,84	4-27	1080,86	5-27	1104,97	6-27	752,06	7-27	743,18	8-27	1512,72	
1-28	1573,38	2-28	1403,29	3-28	1256,01	4-28	1147,03	5-28	1171,14	6-28	818,23	7-28	809,34	8-28	1578,88	
1-29	1616,99	2-29	1446,90	3-29	1299,62	4-29	1190,64	5-29	1214,75	6-29	861,84	7-29	852,96	8-29	1622,50	
1-30	2261,52	2-30	2091,42	3-30	1944,15	4-30	1835,17	5-30	1859,27	6-30	1506,37	7-30	1497,48	8-30	981,73	
1-31	2443,00	2-31	2272,91	3-31	2125,63	4-31	2016,65	5-31	2040,76	6-31	1687,85	7-31	1678,97	8-31	1163,22	
1-32	2771,37	2-32	2601,28	3-32	2454,00	4-32	2345,02	5-32	2369,13	6-32	2016,22	7-32	2007,33	8-32	1491,59	
1-33	2283,25	2-33	2113,16	3-33	1965,88	4-33	1856,90	5-33	1881,01	6-33	1528,10	7-33	1519,21	8-33	731,19	
1-34	2239,23	2-34	2069,14	3-34	1921,86	4-34	1812,88	5-34	1836,99	6-34	1484,08	7-34	1475,19	8-34	959,45	
1-35	2460,76	2-35	2290,67	3-35	2143,39	4-35	2034,41	5-35	2058,52	6-35	1705,61	7-35	1696,72	8-35	1180,98	
1-36	2670,69	2-36	2500,60	3-36	2353,33	4-36	2244,35	5-36	2268,45	6-36	1915,54	7-36	1906,66	8-36	1390,91	
1-37	2876,20	2-37	2706,11	3-37	2558,83	4-37	2449,85	5-37	2473,96	6-37	2121,05	7-37	2112,16	8-37	1596,42	
1-38	2581,92	2-38	2411,83	3-38	2264,56	4-38	2155,58	5-38	2179,68	6-38	1826,78	7-38	1817,89	8-38	1302,14	
1-39	2571,83	2-39	2401,74	3-39	2254,46	4-39	2145,48	5-39	2169,59	6-39	1816,68	7-39	1807,79	8-39	1292,05	
1-40	2872,19	2-40	2702,10	3-40	2554,83	4-40	2445,85	5-40	2469,95	6-40	2117,04	7-40	2108,16	8-40	1592,41	

Continúa...

<i>Origen en 9</i>		<i>Origen en 10</i>		<i>Origen en 11</i>		<i>Origen en 12</i>		<i>Origen en 13</i>		<i>Origen en 14</i>		<i>Origen en 15</i>		<i>Origen en 16</i>	
<i>O-D</i>	<i>D (m)</i>	<i>O-D</i>	<i>D (m)</i>	<i>O-D</i>	<i>D (m)</i>	<i>O-D</i>	<i>D (m)</i>	<i>O-D</i>	<i>D (m)</i>	<i>O-D</i>	<i>D (m)</i>	<i>O-D</i>	<i>D (m)</i>	<i>O-D</i>	<i>D (m)</i>
9-1	2841,23	10-1	3129,00	11-1	2860,12	12-1	3385,54	13-1	3359,44	14-1	3182,08	15-1	323,62	16-1	606,33
9-2	2671,14	10-2	2958,91	11-2	2690,03	12-2	3215,45	13-2	3189,35	14-2	3011,99	15-2	153,53	16-2	436,24
9-3	2523,87	10-3	2811,64	11-3	2542,76	12-3	3068,17	13-3	3042,07	14-3	2864,71	15-3	8,56	16-3	288,97
9-4	2414,89	10-4	2702,66	11-4	2433,78	12-4	2959,19	13-4	2933,09	14-4	2755,73	15-4	2253,48	16-4	1968,15
9-5	2438,99	10-5	2726,76	11-5	2457,88	12-5	2983,30	13-5	2957,20	14-5	2779,84	15-5	2277,59	16-5	1992,26
9-6	2086,09	10-6	2373,86	11-6	2104,98	12-6	2630,39	13-6	2604,29	14-6	2426,93	15-6	1924,68	16-6	1639,35
9-7	2077,20	10-7	2364,97	11-7	2096,09	12-7	2621,50	13-7	2595,41	14-7	2418,05	15-7	1915,80	16-7	1630,47
9-8	169,71	10-8	133,39	11-8	149,55	12-8	2105,76	13-8	2079,66	14-8	1902,30	15-8	2685,34	16-8	2400,01
9-9	0,00	10-9	294,26	11-9	25,38	12-9	1942,53	13-9	1916,44	14-9	1739,07	15-9	2522,11	16-9	2236,79
9-10	294,26	10-10	0,00	11-10	274,09	12-10	2230,30	13-10	2204,21	14-10	2026,84	15-10	2809,88	16-10	2524,55
9-11	25,38	10-11	274,09	11-11	0,00	12-11	1961,42	13-11	1935,33	14-11	1757,96	15-11	2541,00	16-11	2255,68
9-12	1942,53	10-12	2230,30	11-12	1961,42	12-12	0,00	13-12	33,26	14-12	210,71	15-12	3066,41	16-12	2781,09
9-13	1916,44	10-13	2204,21	11-13	1935,33	12-13	33,26	13-13	0,00	14-13	184,61	15-13	3040,32	16-13	2754,99
9-14	1739,07	10-14	2026,84	11-14	1757,96	12-14	210,71	13-14	184,61	14-14	0,00	15-14	2862,96	16-14	2577,63
9-15	2522,11	10-15	2809,88	11-15	2541,00	12-15	3066,41	13-15	3040,32	14-15	2862,96	15-15	0,00	16-15	287,21
9-16	2236,79	10-16	2524,55	11-16	2255,68	12-16	2781,09	13-16	2754,99	14-16	2577,63	15-16	287,21	16-16	0,00
9-17	2098,74	10-17	2386,51	11-17	2117,63	12-17	2643,04	13-17	2616,94	14-17	2439,58	15-17	429,93	16-17	144,61
9-18	1891,90	10-18	2179,67	11-18	1910,79	12-18	2436,20	13-18	2410,11	14-18	2232,75	15-18	1730,50	16-18	1445,17
9-19	1598,45	10-19	1886,22	11-19	1617,34	12-19	2142,75	13-19	2116,65	14-19	1939,29	15-19	1437,04	16-19	1151,72
9-20	1430,25	10-20	1718,02	11-20	1449,14	12-20	1974,55	13-20	1948,45	14-20	1771,09	15-20	1268,84	16-20	983,52
9-21	1669,40	10-21	1957,17	11-21	1688,29	12-21	2213,71	13-21	2187,61	14-21	2010,25	15-21	1508,00	16-21	1222,67
9-22	1492,42	10-22	1780,18	11-22	1511,31	12-22	2036,72	13-22	2010,62	14-22	1833,26	15-22	1331,01	16-22	1045,68
9-23	226,48	10-23	514,25	11-23	245,37	12-23	1724,53	13-23	1698,44	14-23	1521,08	15-23	2304,11	16-23	2018,79
9-24	653,81	10-24	941,58	11-24	672,70	12-24	1290,84	13-24	1264,74	14-24	1087,38	15-24	1870,42	16-24	1585,09
9-25	193,53	10-25	481,30	11-25	212,42	12-25	1752,69	13-25	1726,60	14-25	1549,24	15-25	2332,28	16-25	2046,95
9-26	1499,42	10-26	1787,18	11-26	1518,31	12-26	450,61	13-26	424,52	14-26	247,15	15-26	2623,30	16-26	2337,97
9-27	1349,49	10-27	1637,26	11-27	1368,38	12-27	1893,79	13-27	1867,70	14-27	1690,34	15-27	1188,09	16-27	902,76
9-28	1415,66	10-28	1703,43	11-28	1434,55	12-28	1959,96	13-28	1933,87	14-28	1756,50	15-28	1254,26	16-28	968,93
9-29	1459,27	10-29	1747,04	11-29	1478,16	12-29	2003,58	13-29	1977,48	14-29	1800,12	15-29	1297,87	16-29	1012,54
9-30	818,51	10-30	1106,28	11-30	837,40	12-30	1362,81	13-30	1336,72	14-30	1159,35	15-30	1942,39	16-30	1657,07
9-31	999,99	10-31	1287,76	11-31	1018,88	12-31	1544,30	13-31	1518,20	14-31	1340,84	15-31	2123,88	16-31	1838,55
9-32	1328,36	10-32	1616,13	11-32	1347,25	12-32	1872,66	13-32	1846,57	14-32	1669,21	15-32	2452,24	16-32	2166,92
9-33	567,96	10-33	855,73	11-33	586,85	12-33	1384,54	13-33	1358,45	14-33	1181,09	15-33	1964,12	16-33	1678,80
9-34	796,22	10-34	1083,99	11-34	815,11	12-34	1340,52	13-34	1314,43	14-34	1137,07	15-34	1920,11	16-34	1634,78
9-35	1017,75	10-35	1305,52	11-35	1036,64	12-35	1562,05	13-35	1535,96	14-35	1358,60	15-35	2141,64	16-35	1856,31
9-36	1227,69	10-36	1515,46	11-36	1246,58	12-36	1771,99	13-36	1745,89	14-36	1568,53	15-36	2351,57	16-36	2066,24
9-37	1433,19	10-37	1720,96	11-37	1452,08	12-37	1340,47	13-37	1314,37	14-37	1137,01	15-37	2557,08	16-37	2271,75
9-38	1138,92	10-38	1426,69	11-38	1157,81	12-38	811,89	13-38	785,80	14-38	608,43	15-38	2262,80	16-38	1977,47
9-39	1128,82	10-39	1416,59	11-39	1147,71	12-39	1036,10	13-39	1010,00	14-39	832,64	15-39	2252,70	16-39	1967,38
9-40	1429,19	10-40	1716,96	11-40	1448,08	12-40	1336,46	13-40	1310,37	14-40	1133,01	15-40	2553,07	16-40	2267,74

Continúa...

	<i>Origen en 17</i>		<i>Origen en 18</i>		<i>Origen en 19</i>		<i>Origen en 20</i>		<i>Origen en 21</i>		<i>Origen en 22</i>		<i>Origen en 23</i>		<i>Origen en 24</i>	
<i>O-D</i>	D (m)	O-D	D (m)													
17-1	749,06	18-1	2049,62	19-1	1756,17	20-1	1587,96	21-1	1827,12	22-1	1650,13	23-1	2623,24	24-1	2189,54	
17-2	578,97	18-2	1879,53	19-2	1586,08	20-2	1417,87	21-2	1657,03	22-2	1480,04	23-2	2453,15	24-2	2019,45	
17-3	431,69	18-3	1732,25	19-3	1438,80	20-3	1270,60	21-3	1509,75	22-3	1332,77	23-3	2305,87	24-3	1872,17	
17-4	1830,11	18-4	528,68	19-4	821,87	20-4	990,47	21-4	750,78	22-4	927,96	23-4	2196,89	24-4	1763,19	
17-5	1854,22	18-5	552,78	19-5	845,98	20-5	1014,58	21-5	774,89	22-5	952,07	23-5	2221,00	24-5	1787,30	
17-6	1501,31	18-6	199,88	19-6	493,07	20-6	661,67	21-6	421,98	22-6	599,16	23-6	1868,09	24-6	1434,39	
17-7	1492,42	18-7	190,99	19-7	484,18	20-7	652,78	21-7	413,09	22-7	590,28	23-7	1859,20	24-7	1425,51	
17-8	2261,96	18-8	2055,13	19-8	1761,67	20-8	1593,47	21-8	1832,63	22-8	1655,64	23-8	389,70	24-8	817,03	
17-9	2098,74	18-9	1891,90	19-9	1598,45	20-9	1430,25	21-9	1669,40	22-9	1492,42	23-9	226,48	24-9	653,81	
17-10	2386,51	18-10	2179,67	19-10	1886,22	20-10	1718,02	21-10	1957,17	22-10	1780,18	23-10	514,25	24-10	941,58	
17-11	2117,63	18-11	1910,79	19-11	1617,34	20-11	1449,14	21-11	1688,29	22-11	1511,31	23-11	245,37	24-11	672,70	
17-12	2643,04	18-12	2436,20	19-12	2142,75	20-12	1974,55	21-12	2213,71	22-12	2036,72	23-12	1724,53	24-12	1290,84	
17-13	2616,94	18-13	2410,11	19-13	2116,65	20-13	1948,45	21-13	2187,61	22-13	2010,62	23-13	1698,44	24-13	1264,74	
17-14	2439,58	18-14	2232,75	19-14	1939,29	20-14	1771,09	21-14	2010,25	22-14	1833,26	23-14	1521,08	24-14	1087,38	
17-15	429,93	18-15	1730,50	19-15	1437,04	20-15	1268,84	21-15	1508,00	22-15	1331,01	23-15	2304,11	24-15	1870,42	
17-16	144,61	18-16	1445,17	19-16	1151,72	20-16	983,52	21-16	1222,67	22-16	1045,68	23-16	2018,79	24-16	1585,09	
17-17	0,00	18-17	1307,12	19-17	1013,67	20-17	845,47	21-17	1084,62	22-17	907,64	23-17	1880,74	24-17	1447,04	
17-18	1307,12	18-18	0,00	19-18	298,89	20-18	467,49	21-18	227,80	22-18	404,98	23-18	1673,91	24-18	1240,21	
17-19	1013,67	18-19	298,89	19-19	0,00	20-19	174,03	21-19	76,39	22-19	111,52	23-19	1380,45	24-19	946,75	
17-20	845,47	18-20	467,49	19-20	174,03	20-20	0,00	21-20	244,99	22-20	68,00	23-20	1212,25	24-20	778,55	
17-21	1084,62	18-21	227,80	19-21	76,39	20-21	244,99	21-21	0,00	22-21	182,48	23-21	1451,41	24-21	1017,71	
17-22	907,64	18-22	404,98	19-22	111,52	20-22	68,00	21-22	182,48	22-22	0,00	23-22	1274,42	24-22	840,72	
17-23	1880,74	18-23	1673,91	19-23	1380,45	20-23	1212,25	21-23	1451,41	22-23	1274,42	23-23	0,00	24-23	435,81	
17-24	1447,04	18-24	1240,21	19-24	946,75	20-24	778,55	21-24	1017,71	22-24	840,72	23-24	435,81	24-24	0,00	
17-25	1908,90	18-25	1702,07	19-25	1408,61	20-25	1240,41	21-25	1479,57	22-25	1302,58	23-25	36,64	24-25	463,97	
17-26	2199,92	18-26	1993,09	19-26	1699,63	20-26	1531,43	21-26	1770,59	22-26	1593,60	23-26	1281,42	24-26	847,72	
17-27	764,71	18-27	557,88	19-27	264,42	20-27	96,22	21-27	335,38	22-27	158,39	23-27	1131,50	24-27	697,80	
17-28	830,88	18-28	624,05	19-28	330,59	20-28	162,39	21-28	401,55	22-28	224,56	23-28	1197,66	24-28	763,97	
17-29	874,50	18-29	667,66	19-29	374,21	20-29	206,00	21-29	445,16	22-29	268,17	23-29	1241,28	24-29	807,58	
17-30	1519,02	18-30	1312,18	19-30	1018,73	20-30	850,53	21-30	1089,68	22-30	912,70	23-30	600,51	24-30	166,82	
17-31	1700,50	18-31	1493,67	19-31	1200,21	20-31	1032,01	21-31	1271,17	22-31	1094,18	23-31	782,00	24-31	348,30	
17-32	2028,87	18-32	1822,03	19-32	1528,58	20-32	1360,38	21-32	1599,54	22-32	1422,55	23-32	1110,36	24-32	676,67	
17-33	1540,75	18-33	1333,92	19-33	1040,46	20-33	872,26	21-33	1111,42	22-33	934,43	23-33	349,97	24-33	95,82	
17-34	1496,73	18-34	1289,90	19-34	996,44	20-34	828,24	21-34	1067,40	22-34	890,41	23-34	578,23	24-34	144,53	
17-35	1718,26	18-35	1511,43	19-35	1217,97	20-35	1049,77	21-35	1288,93	22-35	1111,94	23-35	799,76	24-35	366,06	
17-36	1928,20	18-36	1721,36	19-36	1427,91	20-36	1259,71	21-36	1498,86	22-36	1321,87	23-36	1009,69	24-36	575,99	
17-37	2133,70	18-37	1926,87	19-37	1633,41	20-37	1465,21	21-37	1704,37	22-37	1527,38	23-37	1215,20	24-37	781,50	
17-38	1839,43	18-38	1632,59	19-38	1339,14	20-38	1170,94	21-38	1410,09	22-38	1233,10	23-38	920,92	24-38	487,23	
17-39	1829,33	18-39	1622,49	19-39	1329,04	20-39	1160,84	21-39	1400,00	22-39	1223,01	23-39	910,82	24-39	477,13	
17-40	2129,70	18-40	1922,86	19-40	1629,41	20-40	1461,21	21-40	1700,36	22-40	1523,37	23-40	1211,19	24-40	777,49	

Continúa...

<i>Origen en 25</i>		<i>Origen en 26</i>		<i>Origen en 27</i>		<i>Origen en 28</i>		<i>Origen en 29</i>		<i>Origen en 30</i>		<i>Origen en 31</i>		<i>Origen en 32</i>	
<i>O-D</i>	<i>D (m)</i>														
25-1	2651,40	26-1	2942,42	27-1	1507,21	28-1	1573,38	29-1	1616,99	30-1	2261,52	31-1	2443,00	32-1	2771,37
25-2	2481,31	26-2	2772,33	27-2	1337,12	28-2	1403,29	29-2	1446,90	30-2	2091,42	31-2	2272,91	32-2	2601,28
25-3	2334,03	26-3	2625,05	27-3	1189,84	28-3	1256,01	29-3	1299,62	30-3	1944,15	31-3	2125,63	32-3	2454,00
25-4	2225,05	26-4	2516,07	27-4	1080,86	28-4	1147,03	29-4	1190,64	30-4	1835,17	31-4	2016,65	32-4	2345,02
25-5	2249,16	26-5	2540,18	27-5	1104,97	28-5	1171,14	29-5	1214,75	30-5	1859,27	31-5	2040,76	32-5	2369,13
25-6	1896,25	26-6	2187,27	27-6	752,06	28-6	818,23	29-6	861,84	30-6	1506,37	31-6	1687,85	32-6	2016,22
25-7	1887,36	26-7	2178,39	27-7	743,18	28-7	809,34	29-7	852,96	30-7	1497,48	31-7	1678,97	32-7	2007,33
25-8	356,76	26-8	1662,64	27-8	1512,72	28-8	1578,88	29-8	1622,50	30-8	981,73	31-8	1163,22	32-8	1491,59
25-9	193,53	26-9	1499,42	27-9	1349,49	28-9	1415,66	29-9	1459,27	30-9	818,51	31-9	999,99	32-9	1328,36
25-10	481,30	26-10	1787,18	27-10	1637,26	28-10	1703,43	29-10	1747,04	30-10	1106,28	31-10	1287,76	32-10	1616,13
25-11	212,42	26-11	1518,31	27-11	1368,38	28-11	1434,55	29-11	1478,16	30-11	837,40	31-11	1018,88	32-11	1347,25
25-12	1752,69	26-12	450,61	27-12	1893,79	28-12	1959,96	29-12	2003,58	30-12	1362,81	31-12	1544,30	32-12	1872,66
25-13	1726,60	26-13	424,52	27-13	1867,70	28-13	1933,87	29-13	1977,48	30-13	1336,72	31-13	1518,20	32-13	1846,57
25-14	1549,24	26-14	247,15	27-14	1690,34	28-14	1756,50	29-14	1800,12	30-14	1159,35	31-14	1340,84	32-14	1669,21
25-15	2332,28	26-15	2623,30	27-15	1188,09	28-15	1254,26	29-15	1297,87	30-15	1942,39	31-15	2123,88	32-15	2452,24
25-16	2046,95	26-16	2337,97	27-16	902,76	28-16	968,93	29-16	1012,54	30-16	1657,07	31-16	1838,55	32-16	2166,92
25-17	1908,90	26-17	2199,92	27-17	764,71	28-17	830,88	29-17	874,50	30-17	1519,02	31-17	1700,50	32-17	2028,87
25-18	1702,07	26-18	1993,09	27-18	557,88	28-18	624,05	29-18	667,66	30-18	1312,18	31-18	1493,67	32-18	1822,03
25-19	1408,61	26-19	1699,63	27-19	264,42	28-19	330,59	29-19	374,21	30-19	1018,73	31-19	1200,21	32-19	1528,58
25-20	1240,41	26-20	1531,43	27-20	96,22	28-20	162,39	29-20	206,00	30-20	850,53	31-20	1032,01	32-20	1360,38
25-21	1479,57	26-21	1770,59	27-21	335,38	28-21	401,55	29-21	445,16	30-21	1089,68	31-21	1271,17	32-21	1599,54
25-22	1302,58	26-22	1593,60	27-22	158,39	28-22	224,56	29-22	268,17	30-22	912,70	31-22	1094,18	32-22	1422,55
25-23	36,64	26-23	1281,42	27-23	1131,50	28-23	1197,66	29-23	1241,28	30-23	600,51	31-23	782,00	32-23	1110,36
25-24	463,97	26-24	847,72	27-24	697,80	28-24	763,97	29-24	807,58	30-24	166,82	31-24	348,30	32-24	676,67
25-25	0,00	26-25	1309,58	27-25	1159,66	28-25	1225,82	29-25	1269,44	30-25	628,67	31-25	810,16	32-25	1138,53
25-26	1309,58	26-26	0,00	27-26	1450,68	28-26	1516,85	29-26	1560,46	30-26	919,70	31-26	1101,18	32-26	1429,55
25-27	1159,66	26-27	1450,68	27-27	0,00	28-27	73,62	29-27	117,23	30-27	769,77	31-27	951,26	32-27	1279,62
25-28	1225,82	26-28	1516,85	27-28	73,62	28-28	0,00	29-28	51,54	30-28	835,94	31-28	1017,43	32-28	1345,79
25-29	1269,44	26-29	1560,46	27-29	117,23	28-29	51,54	29-29	0,00	30-29	879,56	31-29	1061,04	32-29	1389,41
25-30	628,67	26-30	919,70	27-30	769,77	28-30	835,94	29-30	879,56	30-30	0,00	31-30	184,35	32-30	512,71
25-31	810,16	26-31	1101,18	27-31	951,26	28-31	1017,43	29-31	1061,04	30-31	184,35	31-31	0,00	32-31	331,94
25-32	1138,53	26-32	1429,55	27-32	1279,62	28-32	1345,79	29-32	1389,41	30-32	512,71	31-32	331,94	32-32	0,00
25-33	378,13	26-33	941,43	27-33	791,50	28-33	857,67	29-33	901,29	30-33	260,52	31-33	442,01	32-33	770,37
25-34	606,39	26-34	897,41	27-34	747,49	28-34	813,65	29-34	857,27	30-34	31,97	31-34	213,46	32-34	541,83
25-35	827,92	26-35	1118,94	27-35	969,02	28-35	1035,18	29-35	1078,80	30-35	202,11	31-35	21,33	32-35	320,16
25-36	1037,85	26-36	1328,87	27-36	1178,95	28-36	1245,12	29-36	1288,73	30-36	412,04	31-36	231,26	32-36	338,73
25-37	1243,36	26-37	897,35	27-37	1384,46	28-37	1450,62	29-37	1494,24	30-37	853,47	31-37	1034,96	32-37	1363,33
25-38	949,08	26-38	368,78	27-38	1090,18	28-38	1156,35	29-38	1199,96	30-38	559,20	31-38	740,68	32-38	1069,05
25-39	938,98	26-39	592,98	27-39	1080,08	28-39	1146,25	29-39	1189,87	30-39	549,10	31-39	730,59	32-39	1058,95
25-40	1239,35	26-40	893,35	27-40	1380,45	28-40	1446,62	29-40	1490,23	30-40	849,47	31-40	1030,95	32-40	1359,32

Continúa...

<i>Origen en 33</i>		<i>Origen en 34</i>		<i>Origen en 35</i>		<i>Origen en 36</i>		<i>Origen en 37</i>		<i>Origen en 38</i>		<i>Origen en 39</i>		<i>Origen en 40</i>	
<i>O-D</i>	<i>D (m)</i>														
33-1	2283,25	34-1	2239,23	35-1	2460,76	36-1	2670,69	37-1	2876,20	38-1	2581,92	39-1	2571,83	40-1	2872,19
33-2	2113,16	34-2	2069,14	35-2	2290,67	36-2	2500,60	37-2	2706,11	38-2	2411,83	39-2	2401,74	40-2	2702,10
33-3	1965,88	34-3	1921,86	35-3	2143,39	36-3	2353,33	37-3	2558,83	38-3	2264,56	39-3	2254,46	40-3	2554,83
33-4	1856,90	34-4	1812,88	35-4	2034,41	36-4	2244,35	37-4	2449,85	38-4	2155,58	39-4	2145,48	40-4	2445,85
33-5	1881,01	34-5	1836,99	35-5	2058,52	36-5	2268,45	37-5	2473,96	38-5	2179,68	39-5	2169,59	40-5	2469,95
33-6	1528,10	34-6	1484,08	35-6	1705,61	36-6	1915,54	37-6	2121,05	38-6	1826,78	39-6	1816,68	40-6	2117,04
33-7	1519,21	34-7	1475,19	35-7	1696,72	36-7	1906,66	37-7	2112,16	38-7	1817,89	39-7	1807,79	40-7	2108,16
33-8	731,19	34-8	959,45	35-8	1180,98	36-8	1390,91	37-8	1596,42	38-8	1302,14	39-8	1292,05	40-8	1592,41
33-9	567,96	34-9	796,22	35-9	1017,75	36-9	1227,69	37-9	1433,19	38-9	1138,92	39-9	1128,82	40-9	1429,19
33-10	855,73	34-10	1083,99	35-10	1305,52	36-10	1515,46	37-10	1720,96	38-10	1426,69	39-10	1416,59	40-10	1716,96
33-11	586,85	34-11	815,11	35-11	1036,64	36-11	1246,58	37-11	1452,08	38-11	1157,81	39-11	1147,71	40-11	1448,08
33-12	1384,54	34-12	1340,52	35-12	1562,05	36-12	1771,99	37-12	1340,47	38-12	811,89	39-12	1036,10	40-12	1336,46
33-13	1358,45	34-13	1314,43	35-13	1535,96	36-13	1745,89	37-13	1314,37	38-13	785,80	39-13	1010,00	40-13	1310,37
33-14	1181,09	34-14	1137,07	35-14	1358,60	36-14	1568,53	37-14	1137,01	38-14	608,43	39-14	832,64	40-14	1133,01
33-15	1964,12	34-15	1920,11	35-15	2141,64	36-15	2351,57	37-15	2557,08	38-15	2262,80	39-15	2252,70	40-15	2553,07
33-16	1678,80	34-16	1634,78	35-16	1856,31	36-16	2066,24	37-16	2271,75	38-16	1977,47	39-16	1967,38	40-16	2267,74
33-17	1540,75	34-17	1496,73	35-17	1718,26	36-17	1928,20	37-17	2133,70	38-17	1839,43	39-17	1829,33	40-17	2129,70
33-18	1333,92	34-18	1289,90	35-18	1511,43	36-18	1721,36	37-18	1926,87	38-18	1632,59	39-18	1622,49	40-18	1922,86
33-19	1040,46	34-19	996,44	35-19	1217,97	36-19	1427,91	37-19	1633,41	38-19	1339,14	39-19	1329,04	40-19	1629,41
33-20	872,26	34-20	828,24	35-20	1049,77	36-20	1259,71	37-20	1465,21	38-20	1170,94	39-20	1160,84	40-20	1461,21
33-21	1111,42	34-21	1067,40	35-21	1288,93	36-21	1498,86	37-21	1704,37	38-21	1410,09	39-21	1400,00	40-21	1700,36
33-22	934,43	34-22	890,41	35-22	1111,94	36-22	1321,87	37-22	1527,38	38-22	1233,10	39-22	1223,01	40-22	1523,37
33-23	349,97	34-23	578,23	35-23	799,76	36-23	1009,69	37-23	1215,20	38-23	920,92	39-23	910,82	40-23	1211,19
33-24	95,82	34-24	144,53	35-24	366,06	36-24	575,99	37-24	781,50	38-24	487,23	39-24	477,13	40-24	777,49
33-25	378,13	34-25	606,39	35-25	827,92	36-25	1037,85	37-25	1243,36	38-25	949,08	39-25	938,98	40-25	1239,35
33-26	941,43	34-26	897,41	35-26	1118,94	36-26	1328,87	37-26	897,35	38-26	368,78	39-26	592,98	40-26	893,35
33-27	791,50	34-27	747,49	35-27	969,02	36-27	1178,95	37-27	1384,46	38-27	1090,18	39-27	1080,08	40-27	1380,45
33-28	857,67	34-28	813,65	35-28	1035,18	36-28	1245,12	37-28	1450,62	38-28	1156,35	39-28	1146,25	40-28	1446,62
33-29	901,29	34-29	857,27	35-29	1078,80	36-29	1288,73	37-29	1494,24	38-29	1199,96	39-29	1189,87	40-29	1490,23
33-30	260,52	34-30	31,97	35-30	202,11	36-30	412,04	37-30	853,47	38-30	559,20	39-30	549,10	40-30	849,47
33-31	442,01	34-31	213,46	35-31	21,33	36-31	231,26	37-31	1034,96	38-31	740,68	39-31	730,59	40-31	1030,95
33-32	770,37	34-32	541,83	35-32	320,16	36-32	338,73	37-32	1363,33	38-32	1069,05	39-32	1058,95	40-32	1359,32
33-33	0,00	34-33	238,24	35-33	459,77	36-33	669,70	37-33	875,21	38-33	580,93	39-33	570,83	40-33	871,20
33-34	238,24	34-34	0,00	35-34	231,22	36-34	441,15	37-34	831,19	38-34	536,91	39-34	526,82	40-34	827,18
33-35	459,77	34-35	231,22	35-35	0,00	36-35	219,48	37-35	1052,72	38-35	758,44	39-35	748,34	40-35	1048,71
33-36	669,70	34-36	441,15	35-36	219,48	36-36	0,00	37-36	1262,65	38-36	968,38	39-36	958,28	40-36	1258,65
33-37	875,21	34-37	831,19	35-37	1052,72	36-37	1262,65	37-37	0,00	38-37	536,86	39-37	317,59	40-37	10,12
33-38	580,93	34-38	536,91	35-38	758,44	36-38	968,38	37-38	536,86	38-38	0,00	39-38	232,48	40-38	532,85
33-39	570,83	34-39	526,82	35-39	748,34	36-39	958,28	37-39	317,59	38-39	232,48	39-39	0,00	40-39	313,59
33-40	871,20	34-40	827,18	35-40	1048,71	36-40	1258,65	37-40	10,12	38-40	532,85	39-40	313,59	40-40	0,00

O-D: Origen-Destino, D: Distancia

Anexo C: Código del algoritmo.

```
1  unit Data;
2
3  interface
4
5  uses
6      System.Classes, Data.DB, Datasnap.DBClient, System.Types,
7      Vcl.DBGrids, XQuery;
8
9  type
10     TdtmMain = class(TDataModule)
11         dtsMain: TDataSource;
12         qryMain: TxQuery;
13         dtsQuery: TDataSource;
14         cdsMain: TClientDataSet;
15         cdsMainNo: TIntegerField;
16         cdsMain_Min: TIntegerField;
17         cdsMain_Max: TIntegerField;
18         cdsMainTotal: TIntegerField;
19         cdsMain_1: TIntegerField;
20         cdsMain_2: TIntegerField;
21         cdsMain_3: TIntegerField;
22         cdsMain_4: TIntegerField;
23         cdsMain_5: TIntegerField;
24         cdsMain_6: TIntegerField;
25         cdsMain_7: TIntegerField;
26         cdsMain_8: TIntegerField;
27         cdsMain_9: TIntegerField;
28         cdsMain_10: TIntegerField;
29         cdsMain_11: TIntegerField;
30         cdsMain_12: TIntegerField;
31         cdsMain_13: TIntegerField;
32         cdsMain_14: TIntegerField;
33         cdsMain_15: TIntegerField;
34         cdsMain_16: TIntegerField;
35         cdsMain_17: TIntegerField;
36         cdsMain_18: TIntegerField;
37         cdsMain_19: TIntegerField;
38         cdsMain_20: TIntegerField;
```

39 cdsMain_21: TIntegerField;
40 cdsMain_22: TIntegerField;
41 cdsMain_23: TIntegerField;
42 cdsMain_24: TIntegerField;
43 cdsMain_25: TIntegerField;
44 cdsMain_26: TIntegerField;
45 cdsMain_27: TIntegerField;
46 cdsMain_28: TIntegerField;
47 cdsMain_29: TIntegerField;
48 cdsMain_30: TIntegerField;
49 cdsMain_31: TIntegerField;
50 cdsMain_32: TIntegerField;
51 cdsMain_33: TIntegerField;
52 cdsMain_34: TIntegerField;
53 cdsMain_35: TIntegerField;
54 cdsMain_36: TIntegerField;
55 cdsMain_37: TIntegerField;
56 cdsMain_38: TIntegerField;
57 cdsMain_39: TIntegerField;
58 cdsMain_40: TIntegerField;
59 cdsMain_41: TIntegerField;
60 cdsMain_42: TIntegerField;
61 cdsMain_43: TIntegerField;
62 cdsMain_44: TIntegerField;
63 cdsMain_45: TIntegerField;
64 cdsMain_46: TIntegerField;
65 cdsMain_47: TIntegerField;
66 cdsMain_48: TIntegerField;
67 cdsMain_49: TIntegerField;
68 cdsMain_50: TIntegerField;
69 cdsMain_51: TIntegerField;
70 cdsMain_52: TIntegerField;
71 cdsMain_53: TIntegerField;
72 cdsMain_54: TIntegerField;
73 cdsMain_55: TIntegerField;
74 cdsMain_56: TIntegerField;
75 cdsMain_57: TIntegerField;
76 cdsMain_58: TIntegerField;
77 cdsMain_59: TIntegerField;
78 cdsMain_60: TIntegerField;
79 cdsMain_61: TIntegerField;
80 cdsMain_62: TIntegerField;
81 cdsMain_63: TIntegerField;

82 cdsMain_64: TIntegerField;
83 cdsMain_65: TIntegerField;
84 cdsMain_66: TIntegerField;
85 cdsMain_67: TIntegerField;
86 cdsMain_68: TIntegerField;
87 cdsMain_69: TIntegerField;
88 cdsMain_70: TIntegerField;
89 cdsMain_71: TIntegerField;
90 cdsMain_72: TIntegerField;
91 cdsMain_73: TIntegerField;
92 cdsMain_74: TIntegerField;
93 cdsMain_75: TIntegerField;
94 cdsMain_76: TIntegerField;
95 cdsMain_77: TIntegerField;
96 cdsMain_78: TIntegerField;
97 cdsMain_79: TIntegerField;
98 cdsMain_80: TIntegerField;
99 cdsMain_81: TIntegerField;
100 cdsMain_82: TIntegerField;
101 cdsMain_83: TIntegerField;
102 cdsMain_84: TIntegerField;
103 cdsMain_85: TIntegerField;
104 cdsMain_86: TIntegerField;
105 cdsMain_87: TIntegerField;
106 cdsMain_88: TIntegerField;
107 cdsMain_89: TIntegerField;
108 cdsMain_90: TIntegerField;
109 cdsMain_91: TIntegerField;
110 cdsMain_92: TIntegerField;
111 cdsMain_93: TIntegerField;
112 cdsMain_94: TIntegerField;
113 cdsMain_95: TIntegerField;
114 cdsMain_96: TIntegerField;
115 cdsMain_97: TIntegerField;
116 cdsMain_98: TIntegerField;
117 cdsMain_99: TIntegerField;
118 cdsMainDigito: TIntegerField;
119 cdsRoutes: TClientDataSet;
120 cdsRoutesNo: TIntegerField;
121 cdsRoutes_1: TIntegerField;
122 cdsRoutes_2: TIntegerField;
123 cdsRoutes_3: TIntegerField;
124 cdsRoutes_4: TIntegerField;

125 cdsRoutes_5: TIntegerField;
126 cdsRoutes_6: TIntegerField;
127 cdsRoutes_7: TIntegerField;
128 cdsRoutes_8: TIntegerField;
129 cdsRoutes_9: TIntegerField;
130 cdsRoutes_10: TIntegerField;
131 cdsRoutes_11: TIntegerField;
132 cdsRoutes_12: TIntegerField;
133 cdsRoutes_13: TIntegerField;
134 cdsRoutes_14: TIntegerField;
135 cdsRoutes_15: TIntegerField;
136 cdsRoutes_16: TIntegerField;
137 cdsRoutes_17: TIntegerField;
138 cdsRoutes_18: TIntegerField;
139 cdsRoutes_19: TIntegerField;
140 cdsRoutes_20: TIntegerField;
141 cdsRoutes_21: TIntegerField;
142 cdsRoutes_22: TIntegerField;
143 cdsRoutes_23: TIntegerField;
144 cdsRoutes_24: TIntegerField;
145 cdsRoutes_25: TIntegerField;
146 cdsRoutes_26: TIntegerField;
147 cdsRoutes_27: TIntegerField;
148 cdsRoutes_28: TIntegerField;
149 cdsRoutes_29: TIntegerField;
150 cdsRoutes_30: TIntegerField;
151 cdsRoutes_31: TIntegerField;
152 cdsRoutes_32: TIntegerField;
153 cdsRoutes_33: TIntegerField;
154 cdsRoutes_34: TIntegerField;
155 cdsRoutes_35: TIntegerField;
156 cdsRoutes_36: TIntegerField;
157 cdsRoutes_37: TIntegerField;
158 cdsRoutes_38: TIntegerField;
159 cdsRoutes_39: TIntegerField;
160 cdsRoutes_40: TIntegerField;
161 cdsRoutes_41: TIntegerField;
162 cdsRoutes_42: TIntegerField;
163 cdsRoutes_43: TIntegerField;
164 cdsRoutes_44: TIntegerField;
165 cdsRoutes_45: TIntegerField;
166 cdsRoutes_46: TIntegerField;
167 cdsRoutes_47: TIntegerField;

168 cdsRoutes_48: TIntegerField;
169 cdsRoutes_49: TIntegerField;
170 cdsRoutes_50: TIntegerField;
171 cdsRoutes_51: TIntegerField;
172 cdsRoutes_52: TIntegerField;
173 cdsRoutes_53: TIntegerField;
174 cdsRoutes_54: TIntegerField;
175 cdsRoutes_55: TIntegerField;
176 cdsRoutes_56: TIntegerField;
177 cdsRoutes_57: TIntegerField;
178 cdsRoutes_58: TIntegerField;
179 cdsRoutes_59: TIntegerField;
180 cdsRoutes_60: TIntegerField;
181 cdsRoutes_61: TIntegerField;
182 cdsRoutes_62: TIntegerField;
183 cdsRoutes_63: TIntegerField;
184 cdsRoutes_64: TIntegerField;
185 cdsRoutes_65: TIntegerField;
186 cdsRoutes_66: TIntegerField;
187 cdsRoutes_67: TIntegerField;
188 cdsRoutes_68: TIntegerField;
189 cdsRoutes_69: TIntegerField;
190 cdsRoutes_70: TIntegerField;
191 cdsRoutes_71: TIntegerField;
192 cdsRoutes_72: TIntegerField;
193 cdsRoutes_73: TIntegerField;
194 cdsRoutes_74: TIntegerField;
195 cdsRoutes_75: TIntegerField;
196 cdsRoutes_76: TIntegerField;
197 cdsRoutes_77: TIntegerField;
198 cdsRoutes_78: TIntegerField;
199 cdsRoutes_79: TIntegerField;
200 cdsRoutes_80: TIntegerField;
201 cdsRoutes_81: TIntegerField;
202 cdsRoutes_82: TIntegerField;
203 cdsRoutes_83: TIntegerField;
204 cdsRoutes_84: TIntegerField;
205 cdsRoutes_85: TIntegerField;
206 cdsRoutes_86: TIntegerField;
207 cdsRoutes_87: TIntegerField;
208 cdsRoutes_88: TIntegerField;
209 cdsRoutes_89: TIntegerField;
210 cdsRoutes_90: TIntegerField;

```

211     cdsRoutes_91: TIntegerField;
212     cdsRoutes_92: TIntegerField;
213     cdsRoutes_93: TIntegerField;
214     cdsRoutes_94: TIntegerField;
215     cdsRoutes_95: TIntegerField;
216     cdsRoutes_96: TIntegerField;
217     cdsRoutes_97: TIntegerField;
218     cdsRoutes_98: TIntegerField;
219     cdsRoutes_99: TIntegerField;
220     cdsRoutesEstatus: TStringField;
221     cdsRoutesGrupos: TStringField;
222     cdsRoutesTotal: TIntegerField;
223     dtsRoutes: TDataSource;
224 private
225     FMax: Integer;
226
227     function OpenQuery(Sentence: string; QueryObject: TQuery = nil): Boolean;
228 public
229     procedure RemoveDuplicates;
230     procedure HideColumns;
231
232     procedure AnalyzeRoutes;
233     procedure GetResults;
234 published
235     property Max: Integer read FMax write FMax;
236 end;
237
238 var
239     dtmMain: TdtmMain;
240
241 implementation
242
243 {%CLASSGROUP 'Vcl.Controls.TControl'}
244
245 {$R *.dfm}
246
247 uses
248     System.SysUtils, Vcl.Dialogs, System.Math, System.Variants,
249     Vcl.Forms,
250     Main;
251

```

```

252 { TdtmMain }
253
254 procedure TdtmMain.AnalyzeRoutes;
255 var
256     i: Integer;
257
258     function CopyRecord(No: Integer): Boolean;
259     var
260         m: Integer;
261         AllData: Variant;
262     begin
263         Result := False;
264
265         try
266             with cdsRoutes do
267                 if Locate('No', No, []) then
268                     begin
269                         AllData := VarArrayCreate([0, FieldCount - 1], varVariant);
270
271                         for m := 0 to FieldCount - 1 do
272                             AllData[m] := Fields[m].Value;
273
274                             Append;
275
276                             for m := 0 to FieldCount - 1 do
277                                 Fields[m].Value := AllData[m];
278
279                                 FieldByName('No').AsInteger := i;
280                                 Inc(i);
281
282                                 Post;
283
284                                 Result := True;
285                             end;
286                     except
287                         on E: Exception do
288                             MessageDlg(E.Message, mtError, [mbOk], 0);
289                     end;
290                 end;
291
292     function TraceRoute(No: Integer): Boolean;

```

```

293  var
294      k, l: Integer;
295      Sentence: string;
296      QueryObject: TxQuery;
297      Ok: Boolean;
298      Complete: Boolean;
299  begin
300      Result := True;
301
302  try
303      QueryObject := TxQuery.Create(Self);
304      QueryObject.DataSets.Add.DataSet := cdsMain;
305
306  try
307      for k := 1 to FMax do
308          begin
309              Application.ProcessMessages;
310
311              with cdsRoutes.FieldByName(Format('%d', [k])) do
312                  if IsNull then
313                      begin
314                          Sentence := Format(
315                              'SELECT *'#13#10 +
316                              'FROM cdsMain'#13#10 +
317                              'WHERE %d IS NOT NULL'#13#10 +
318                              'ORDER BY Total DESC, No',
319                              [k]);
320
321                  if OpenQuery(Sentence, QueryObject) then
322                      with QueryObject do
323                          begin
324                              First;
325                              while not Eof do
326                                  begin
327                                      Application.ProcessMessages;
328
329                                      if CopyRecord(No) then
330                                          begin
331                                              cdsRoutes.Edit;
332

```

```

333     cdsRoutesTotal.Value := cdsRoutesTotal.Value + 1;
334     cdsRoutesGrupos.Value := cdsRoutesGrupos.Value + 1 +
335         FieldByName('No').AsString;
336
337     Ok := True;
338
339     for l := 1 to FMax do
340         with FieldByName(Format('_%d', [l])) do
341             if not IsNull then
342                 if cdsRoutes.FieldByName(Format('_%d', [l])).IsNull then
343                     cdsRoutes.FieldByName(Format('_%d', [l])).AsInteger :=
344                         FieldByName('No').AsInteger
345                 else
346                     begin
347                         cdsRoutesEstatus.Value := 'Colisión';
348
349                         Ok := False;
350
351                         Break;
352                     end;
353
354     Complete := True;
355     for l := 1 to FMax do
356         with cdsRoutes.FieldByName(Format('_%d', [l])) do
357             if IsNull then
358                 begin
359                     Complete := False;
360
361                     Break;
362                 end;
363
364     if Complete then
365         cdsRoutesEstatus.Value := 'Completada';
366
367     cdsRoutes.Post;
368 end;
369
370 if Ok and not Complete then
371     if not TraceRoute(cdsRoutesNo.Value) then
372         Break;

```

```

372
373         if not cdsRoutes.Locate('No', No, []) then
374             Break;
375
376             Next;
377         end;
378     end;
379
380         Break;
381     end;
382 end;
383 except
384     on E: Exception do
385     begin
386         MessageDlg(E.Message, mtError, [mbOk], 0);
387
388         Result := False;
389     end;
390 end;
391 finally
392     QueryObject.Free;
393 end;
394 end;
395
396 var
397     j: Integer;
398     Sentence: string;
399     QueryObject: TxQuery;
400 begin
401     try
402         QueryObject := TxQuery.Create(Self);
403         QueryObject.DataSets.Add.DataSet := cdsMain;
404
405         Sentence :=
406             'SELECT *'#13#10 +
407             'FROM cdsMain'#13#10 +
408             'WHERE _1 IS NOT NULL'#13#10 +
409             'ORDER BY Total DESC, No';
410

```

```

411     if OpenQuery(Sentence, QueryObject) then
412         try
413             i := 1;
414
415             cdsRoutes.EmptyDataSet;
416
417             with QueryObject do
418                 begin
419                     First;
420                     while not Eof do
421                         begin
422                             Application.ProcessMessages;
423
424                             cdsRoutes.Append;
425
426                             cdsRoutesNo.Value := i;
427                             Inc(i);
428
429                             cdsRoutesTotal.Value := 1;
430                             cdsRoutesGrupos.Value := FieldByName('No').AsString;
431                             cdsRoutesEstatus.Value := 'Parcial';
432
433                             for j := 1 to FMax do
434                                 with FieldByName(Format('_%d', [j])) do
435                                     if not IsNull then
436                                         cdsRoutes.FieldByName(Format('_%d', [j])).AsInteger := FieldByName(
437                                             'No').AsInteger;
438
439                                     cdsRoutes.Post;
440
441                                     if not TraceRoute(cdsRoutesNo.Value) then
442                                         Break;
443
444                                     Next;
445                                 end;
446                             end;
447
448                             cdsRoutes.First;
449             except

```

```

449         on E: Exception do
450             MessageDlg(E.Message, mtError, [mbOk], 0);
451         end;
452     finally
453         QueryObject.Free;
454     end;
455 end;
456
457 procedure TdtmMain.GetResults;
458 var
459     Sentence: string;
460 begin
461     Sentence :=
462         'SELECT No, Total, Grupos'#13#10 +
463         'FROM cdsRoutes'#13#10 +
464         'WHERE Estatus= "Completada"'#13#10 +
465         'ORDER BY Total DESC, No';
466
467     OpenQuery(Sentence);
468 end;
469
470 procedure TdtmMain.HideColumns;
471 var
472     i: Integer;
473 begin
474     for i := 1 to 99 do
475     begin
476         cdsMain.FieldByName(Format('%d', [i])).Visible := (i <= FMax);
477
478         cdsRoutes.FieldByName(Format('%d', [i])).Visible := (i <= FMax);
479     end;
480 end;
481
482 function TdtmMain.OpenQuery(Sentence: string;
483     QueryObject: TxQuery): Boolean;
484 begin
485     Result := False;
486
487     if not Assigned(QueryObject) then

```

```

488     QueryObject := qryMain;
489
490     with QueryObject do
491     begin
492         Close;
493
494         SQL.Text := Sentence;
495
496         try
497             Open;
498
499             Result := True;
500         except
501             on E: Exception do
502                 MessageDlg(E.Message, mtError, [mbOk], 0);
503             end;
504         end;
505     end;
506
507     procedure TdtmMain.RemoveDuplicates;
508     var
509         Sentence: string;
510         Previous: Integer;
511     begin
512         Sentence :=
513             'SELECT b.No, b.Digito'#13#10 +
514             'FROM('#13#10 +
515             'SELECT Digito, COUNT(*) Contador'#13#10 +
516             'FROM cdsMain'#13#10 +
517             'GROUP BY Digito' +
518             ') a, cdsMain b'#13#10 +
519             'WHERE a.Contador > 1 AND a.Digito = b.Digito'#13#10 +
520             'ORDER BY b.Digito, b.No';
521
522         if OpenQuery(Sentence) then
523         begin
524             Previous := 0;
525
526             with qryMain do

```

```
527     begin
528         First;
529
530     while not Eof do
531     begin
532         if Previous <> FieldByName('Digito').AsInteger then
533             Previous := FieldByName('Digito').AsInteger
534         else
535             begin
536                 if cdsMain.Locate('No', FieldByName('No').AsInteger, []) then
537                     cdsMain.Delete;
538                 end;
539
540             Next;
541         end;
542     end;
543
544     qryMain.Close;
545 end;
546 end;
547
548 end.
549
```