	<b>MACROPROCESO DE APOYO</b>	<b>CÓDIGO: AAAr113</b>
	<b>PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO</b>	<b>VERSIÓN: 3</b>
	<b>DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL</b>	<b>VIGENCIA: 2017-11-16</b>
		<b>PAGINA: 1 de 8</b>

21.1

<b>FECHA</b>	12/12/2019
--------------	------------

Señores  
**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA**  
 BIBLIOTECA  
 Fusagasugá


<b>UNIDAD REGIONAL</b>	Sede Fusagasugá
<b>TIPO DE DOCUMENTO</b>	Tesis
<b>FACULTAD</b>	Ingeniería
<b>NIVEL ACADÉMICO DE FORMACIÓN O PROCESO</b>	Pregrado
<b>PROGRAMA ACADÉMICO</b>	Ingeniería Electrónica

El Autor(Es):

<b>APELLIDOS COMPLETOS</b>	<b>NOMBRES COMPLETOS</b>	<b>No. DOCUMENTO DE IDENTIFICACIÓN</b>
CASALLAS BOHÓRQUEZ	SANTIAGO	1069756746
ESPINEL CHACON	DANNFER SEBASTIAN	1069766426

Diagonal 18 No. 20-29 Fusagasugá – Cundinamarca  
 Teléfono (091) 8281483 Línea Gratuita 018000976000  
 www.ucundinamarca.edu.co E-mail: info@ucundinamarca.edu.co  
 NIT: 890.680.062-2

*Documento controlado por el Sistema de Gestión de la Calidad  
 Asegúrese que corresponde a la última versión consultando el Portal Institucional*

	<b>MACROPROCESO DE APOYO</b>	<b>CÓDIGO: AAAr113</b>
	<b>PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO</b>	<b>VERSIÓN: 3</b>
	<b>DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL</b>	<b>VIGENCIA: 2017-11-16</b>
		<b>PAGINA: 2 de 8</b>

Director(Es) y/o Asesor(Es) del documento:

<b>APELLIDOS COMPLETOS</b>	<b>NOMBRES COMPLETOS</b>
RODRÍGUEZ MUJICA	LEONARDO

<b>TÍTULO DEL DOCUMENTO</b>
DISEÑO DE UN ALGORITMO PARA LA PLANEACIÓN DE REDES INALÁMBRICAS RURALES APLICADO EN LA RED LIBRE DE BOSACHOQUE

<b>SUBTÍTULO</b> (Aplica solo para Tesis, Artículos Científicos, Disertaciones, Objetos Virtuales de Aprendizaje)

<b>TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:</b> Aplica para Tesis/Trabajo de Grado/Pasantía
Ingeniero Electrónico

<b>AÑO DE EDICION DEL DOCUMENTO</b>	<b>NÚMERO DE PÁGINAS</b>
12/12/2019	103

<b>DESCRIPTORES O PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS</b> (Usar 6 descriptores o palabras claves)	
<b>ESPAÑOL</b>	<b>INGLÉS</b>
1. Algoritmo	algorithm
2. Planeación de redes inalámbricas	Wireless network planning
3. Redes libres comunitarias	community free networks
4. Redes inalámbricas	redes inalámbricas
5. Telecomunicaciones	Telecommunications
6. Redes inalámbricas en áreas rurales	Wireless networks in rural areas

Diagonal 18 No. 20-29 Fusagasugá – Cundinamarca  
Teléfono (091) 8281483 Línea Gratuita 018000976000  
www.ucundinamarca.edu.co E-mail: info@ucundinamarca.edu.co  
NIT: 890.680.062-2

*Documento controlado por el Sistema de Gestión de la Calidad  
Asegúrese que corresponde a la última versión consultando el Portal Institucional*



<b>MACROPROCESO DE APOYO</b>	<b>CÓDIGO: AAAR113</b>
<b>PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO</b>	<b>VERSIÓN: 3</b>
<b>DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL</b>	<b>VIGENCIA: 2017-11-16</b>
	<b>PAGINA: 3 de 8</b>

## RESUMEN DEL CONTENIDO EN ESPAÑOL E INGLÉS

(Máximo 250 palabras – 1530 caracteres, aplica para resumen en español):

En este trabajo se diseña un algoritmo para la planeación de redes inalámbricas rurales con el propósito de expandir una red rural, implementado en la red libre de Bosachoque ubicada en la provincia del Sumapaz. Para diseñar el algoritmo, se toman como referencia tres trabajos que aportan herramientas de planeación de redes inalámbricas en tres escenarios diferentes, el primero ubicado en la India, un país rural seguido de Escocia un país desarrollado y, por último, Colombia un país en vía de desarrollo; esto permite comparar factores que intervienen en la planeación de una red rural inalámbrica y, de igual modo, comprender los requerimientos de los algoritmos estudiados, además, se utiliza Python como lenguaje de programación y QGIS como herramienta de sistema de información geográfica. Luego, se evalúa el algoritmo comparándolo con heurística simple, encontrando que el algoritmo propuesto tiene un 68% mayor de relación costo-beneficio, posteriormente en la etapa de implementación se ejecuta el algoritmo a partir de unos nodos fuente, nodos objetivo, un grafo de topología propuesta y la ponderación de los datos de las solicitudes de cobertura y el desempeño de la red evidenciados a través de mapas de calor. Nuestro aporte es el diseño de un algoritmo en cuatro subsistemas siendo el primero las entradas, seguido de la planeación incremental de la red, posteriormente la planeación del mínimo costo de infraestructura y así obteniendo la salida entendida como la topología de una red que permita mayor conectividad en relación costo-beneficio y una lista de nodos con mayor retorno de inversión.

In this work an algorithm is designed for the planning of rural wireless networks with the purpose of expanding a rural network, implemented in the free network of Bosachoque located in the province of Sumapaz. To design the algorithm, take as reference three works that provide planning tools for wireless networks in three different scenarios, the first located in India, a rural country followed by Scotland, a developed country and, finally, Colombia a country on track developmental; This allows comparing factors involved in the planning of a rural wireless network and, in the same way, understanding the requirements of the algorithms studied, in addition, Python is used as a programming language and QGIS as a geographic information system tool. Then, it evaluates the algorithm compared to simple heuristics, finding that the proposed algorithm has a 68% higher cost-benefit ratio, later in the implementation stage the algorithm is executed from the source nodes, target nodes, a graph of Proposed topology and weighting of coverage request data and performance of red evidence through heat maps. Our contribution is the design of an algorithm in four subsystems, the first being the inputs, followed by the incremental planning of the network, then the planning of the minimum infrastructure cost and thus obtaining the output understood as the topology of a network that can increase connectivity. in relation cost-benefit and a list of nodes with greater return on investment.



<b>MACROPROCESO DE APOYO</b>	<b>CÓDIGO: AAAr113</b>
<b>PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO</b>	<b>VERSIÓN: 3</b>
<b>DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL</b>	<b>VIGENCIA: 2017-11-16</b>
	<b>PAGINA: 4 de 8</b>

### AUTORIZACION DE PUBLICACIÓN

Por medio del presente escrito autorizo (Autorizamos) a la Universidad de Cundinamarca para que, en desarrollo de la presente licencia de uso parcial, pueda ejercer sobre mí (nuestra) obra las atribuciones que se indican a continuación, teniendo en cuenta que, en cualquier caso, la finalidad perseguida será facilitar, difundir y promover el aprendizaje, la enseñanza y la investigación.

En consecuencia, las atribuciones de usos temporales y parciales que por virtud de la presente licencia se autoriza a la Universidad de Cundinamarca, a los usuarios de la Biblioteca de la Universidad; así como a los usuarios de las redes, bases de datos y demás sitios web con los que la Universidad tenga perfeccionado una alianza, son: Marque con una "X":

<b>AUTORIZO (AUTORIZAMOS)</b>	<b>SI</b>	<b>NO</b>
1. La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer.	x	
2. La comunicación pública por cualquier procedimiento o medio físico o electrónico, así como su puesta a disposición en Internet.	x	
3. La inclusión en bases de datos y en sitios web sean éstos onerosos o gratuitos, existiendo con ellos previa alianza perfeccionada con la Universidad de Cundinamarca para efectos de satisfacer los fines previstos. En este evento, tales sitios y sus usuarios tendrán las mismas facultades que las aquí concedidas con las mismas limitaciones y condiciones.	x	
4. La inclusión en el Repositorio Institucional.	x	

De acuerdo con la naturaleza del uso concedido, la presente licencia parcial se otorga a título gratuito por el máximo tiempo legal colombiano, con el propósito de que en dicho lapso mi (nuestra) obra sea explotada en las condiciones aquí estipuladas y para los fines indicados, respetando siempre la titularidad de los derechos patrimoniales y morales correspondientes, de acuerdo con los usos honrados, de manera proporcional y justificada a la finalidad perseguida, sin ánimo de lucro ni de comercialización.

Para el caso de las Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía, de manera complementaria, garantizo(garantizamos) en mi(nuestra) calidad de estudiante(s) y por ende autor(es) exclusivo(s), que la Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía en cuestión, es producto de mi(nuestra) plena autoría, de mi(nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi(nuestra) creación original particular y, por tanto, soy(somos) el(los) único(s) titular(es) de la misma. Además, aseguro (aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites



<b>MACROPROCESO DE APOYO</b>	<b>CÓDIGO: AAAr113</b>
<b>PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO</b>	<b>VERSIÓN: 3</b>
<b>DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL</b>	<b>VIGENCIA: 2017-11-16</b>
	<b>PAGINA: 5 de 8</b>

autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos de la Tesis o Trabajo de Grado es de mí (nuestra) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Universidad de Cundinamarca por tales aspectos.

Sin perjuicio de los usos y atribuciones otorgadas en virtud de este documento, continuaré (continuaremos) conservando los correspondientes derechos patrimoniales sin modificación o restricción alguna, puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación de los derechos patrimoniales derivados del régimen del Derecho de Autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “*Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores*”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables. En consecuencia, la Universidad de Cundinamarca está en la obligación de RESPETARLOS Y HACERLOS RESPETAR, para lo cual tomará las medidas correspondientes para garantizar su observancia.

**NOTA:** (Para Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía):

**Información Confidencial:**

Esta Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía, contiene información privilegiada, estratégica, secreta, confidencial y demás similar, o hace parte de la investigación que se adelanta y cuyos resultados finales no se han publicado.

**SI \_\_\_ NO \_x\_\_.**

En caso afirmativo expresamente indicaré (indicaremos), en carta adjunta tal situación con el fin de que se mantenga la restricción de acceso.

**LICENCIA DE PUBLICACIÓN**

Como titular(es) del derecho de autor, confiero(erimos) a la Universidad de Cundinamarca una licencia no exclusiva, limitada y gratuita sobre la obra que se integrará en el Repositorio Institucional, que se ajusta a las siguientes características:

a) Estará vigente a partir de la fecha de inclusión en el repositorio, por un plazo de 5 años, que serán prorrogables indefinidamente por el tiempo que dure el derecho

Diagonal 18 No. 20-29 Fusagasugá – Cundinamarca  
Teléfono (091) 8281483 Línea Gratuita 018000976000  
www.ucundinamarca.edu.co E-mail: info@ucundinamarca.edu.co  
NIT: 890.680.062-2



<b>MACROPROCESO DE APOYO</b>	<b>CÓDIGO: AAAR113</b>
<b>PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO</b>	<b>VERSIÓN: 3</b>
<b>DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL</b>	<b>VIGENCIA: 2017-11-16</b>
	<b>PAGINA: 6 de 8</b>

patrimonial del autor. El autor podrá dar por terminada la licencia solicitándolo a la Universidad por escrito. (Para el caso de los Recursos Educativos Digitales, la Licencia de Publicación será permanente).

b) Autoriza a la Universidad de Cundinamarca a publicar la obra en formato y/o soporte digital, conociendo que, dado que se publica en Internet, por este hecho circula con un alcance mundial.

c) Los titulares aceptan que la autorización se hace a título gratuito, por lo tanto, renuncian a recibir beneficio alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente licencia y de la licencia de uso con que se publica.

d) El(Los) Autor(es), garantizo(amos) que el documento en cuestión, es producto de mi(nuestra) plena autoría, de mi(nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi (nuestra) creación original particular y, por tanto, soy(somos) el(los) único(s) titular(es) de la misma. Además, aseguro(aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos es de mí (nuestro) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Universidad de Cundinamarca por tales aspectos.


e) En todo caso la Universidad de Cundinamarca se compromete a indicar siempre la autoría incluyendo el nombre del autor y la fecha de publicación.

f) Los titulares autorizan a la Universidad para incluir la obra en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

g) Los titulares aceptan que la Universidad de Cundinamarca pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.

h) Los titulares autorizan que la obra sea puesta a disposición del público en los términos autorizados en los literales anteriores bajo los límites definidos por la universidad en el "Manual del Repositorio Institucional AAAM003"

i) Para el caso de los Recursos Educativos Digitales producidos por la Oficina de Educación Virtual, sus contenidos de publicación se rigen bajo la Licencia Creative Commons: Atribución- No comercial- Compartir Igual.

	<b>MACROPROCESO DE APOYO</b>	<b>CÓDIGO: AAAR113</b>
	<b>PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO</b>	<b>VERSIÓN: 3</b>
	<b>DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL</b>	<b>VIGENCIA: 2017-11-16</b>
		<b>PAGINA: 7 de 8</b>



j) Para el caso de los Artículos Científicos y Revistas, sus contenidos se rigen bajo la Licencia Creative Commons Atribución- No comercial- Sin derivar.



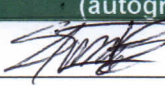

**Nota:**

Si el documento se basa en un trabajo que ha sido patrocinado o apoyado por una entidad, con excepción de Universidad de Cundinamarca, los autores garantizan que se ha cumplido con los derechos y obligaciones requeridos por el respectivo contrato o acuerdo.

La obra que se integrará en el Repositorio Institucional, está en el(los) siguiente(s) archivo(s).

Nombre completo del Archivo Incluida su Extensión (Ej. PerezJuan2017.pdf)	Tipo de documento (ej. Texto, imagen, video, etc.)
1. DISE O	PDF
2.	
3.	
4.	

En constancia de lo anterior, Firmo (amos) el presente documento:

APELLIDOS Y NOMBRES COMPLETOS	FIRMA (autógrafa)
SANTIAGO CASALLAS BOHORQUEZ	
DANFER SEBASTIAN ESPINEL CHACON	

21.1-51-20

**DISEÑO DE UN ALGORITMO PARA LA PLANEACIÓN  
DE REDES INALÁMBRICAS RURALES APLICADO EN  
LA RED LIBRE DE BOSACHOQUE**

**SANTIAGO CASALLAS BOHÓRQUEZ  
DANNFER SEBASTIAN ESPINEL CHACON**

**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
FUSAGASUGÁ.**

**2019**



**DISEÑO DE UN ALGORITMO PARA LA PLANEACIÓN  
DE REDES INALÁMBRICAS RURALES APLICADO EN  
LA RED LIBRE DE BOSACHOQUE**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de  
ingeniero electrónico

Autor(es):

**SANTIAGO CASALLAS BOHÓRQUEZ  
DANNFER SEBASTIAN ESPINEL CHACON**

Director:

**Msc. LEONARDO RODRÍGUEZ MUJICA  
Ingeniero Electrónico**

Línea investigación:

**Software, sistemas emergentes y nuevas tecnologías  
Telemática y telecomunicaciones**

**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
FUSAGASUGÁ.  
2019**

# Dedicatoria

*A mi familia por su apoyo  
A mi madre, Claudia Paola, esto es para ti.*  
Sebastian Espinel

*A mis abuelos, a mi madre, tías, primos y demás familiares, además de mis  
compañeros y amigos que me acompañaron .*  
Santiago Casallas Bohórquez

# Agradecimientos

Agradecemos a Dios por las bendiciones y oportunidades recibidas.

Al ingeniero Leonardo Rodríguez por asesorarnos y brindarnos su conocimiento para lograr este objetivo en esta etapa tan importante de nuestras vidas.

Agradecemos a aquellos docentes, que a lo largo de los años han impreso experiencias imborrables en nuestra memoria y que han contribuido en nuestra formación profesional. A nuestras familias por brindarnos siempre su apoyo incondicional en todo momento, a pesar de las adversidades presentadas.

Agradecemos a nuestros compañeros de universidad y amigos, con quienes compartimos, momentos agradables, vergonzosos y hasta estresantes, los(as) ingenieros(as) Ortegón, Cubillos, Amaya, Bonilla, Florez y Otálora, quienes al pasar de los años nos enseñaron que la vida y el trabajo, se hacen más agradables al estar unidos como grupo.

Por supuesto, agradecemos a todas aquellas personas que directa o indirectamente nos han colaborado en el transcurso de nuestra carrera universitaria brindandonos apoyo y crecimiento personal.

# Resumen

En este trabajo se diseña un algoritmo para la planeación de redes inalámbricas rurales con el propósito de expandir una red rural, implementado en la red libre de Bosachoque ubicada en la provincia del Sumapaz. Para diseñar el algoritmo, se toman como referencia tres trabajos que aportan herramientas de planeación de redes inalámbricas en tres escenarios diferentes, el primero ubicado en la India, un país rural seguido de Escocia un país desarrollado y, por último, Colombia un país en vía de desarrollo; esto permite comparar factores que intervienen en la planeación de una red rural inalámbrica y, de igual modo, comprender los requerimientos de los algoritmos estudiados, además, se utiliza Python como lenguaje de programación y QGIS como herramienta de sistema de información geográfica. Luego, se evalúa el algoritmo comparándolo con heurística simple, encontrando que el algoritmo propuesto tiene un 68% mayor de relación costo-beneficio, posteriormente en la etapa de implementación se ejecuta el algoritmo a partir de unos nodos fuente, nodos objetivo, un grafo de topología propuesta y la ponderación de los datos de las solicitudes de cobertura y el desempeño de la red evidenciados a través de mapas de calor. Nuestro aporte es el diseño de un algoritmo en cuatro subsistemas siendo el primero las entradas, seguido de la planeación incremental de la red, posteriormente la planeación del mínimo costo de infraestructura y así obteniendo la salida entendida como la topología de una red que permita mayor conectividad en relación costo-beneficio y una lista de nodos con mayor retorno de inversión.



# Abstract

In this work an algorithm is designed for the planning of rural wireless networks with the purpose of expanding a rural network, implemented in the free network of Bosachoque located in the province of Sumapaz. To design the algorithm, take as reference three works that provide planning tools for wireless networks in three different scenarios, the first located in India, a rural country followed by Scotland, a developed country and, finally, Colombia a country on track developmental; This allows comparing factors involved in the planning of a rural wireless network and, in the same way, understanding the requirements of the algorithms studied, in addition, Python is used as a programming language and QGIS as a geographic information system tool. Then, it evaluates the algorithm compared to simple heuristics, finding that the proposed algorithm has a 68 % higher cost-benefit ratio, later in the implementation stage the algorithm is executed from the source nodes, target nodes, a graph of Proposed topology and weighting of coverage request data and performance of red evidence through heat maps. Our contribution is the design of an algorithm in four subsystems, the first being the inputs, followed by the incremental planning of the network, then the planning of the minimum infrastructure cost and thus obtaining the output understood as the topology of a network that can increase connectivity. in relation cost-benefit and a list of nodes with greater return on investment.

# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>3</b>
<b>1. El problema</b>	<b>13</b>
1.1. Planteamiento del problema	13
1.1.1. Objetivos del estudio	14
1.1.2. Justificación	15
1.1.3. Alcances y limitaciones	17
<b>2. Marco referencial</b>	<b>18</b>
2.1. Antecedentes	18
2.1.1. Descripción de la red libre de Bosachoque	19
2.2. Marco Teórico	21
2.2.1. Brecha Digital	21
2.2.2. ESTADO DEL ARTE	27
<b>3. Diseño metodológico</b>	<b>42</b>
3.1. Analizar la información recopilada de redes inalámbricas enfocada a zonas rurales	42
3.1.1. Diseñar un algoritmo que permita identificar la mejor estrategia de expansión de la red inalámbrica en zonas rurales	45
3.1.2. Evaluar el algoritmo mediante una simulación numérica, comparándolo con Heurística simple	78
3.1.3. Aplicar el algoritmo propuesto en la Red Libre de Bosachoque analizando la topología adecuada para futuras expansiones de la red en las Instituciones Educativas Rurales de la región del Sumapaz-Cundinamarca considerando la relación costo-beneficio	83
<b>4. Análisis de resultados</b>	<b>92</b>
4.1. Conclusiones y trabajos futuros	97

# Índice de figuras

2.1. Topología de red, vereda Bosachoque. Fuente [18]	20
2.2. Brecha Digital. Fuente (Autores)	21
2.3. Zona de Fresnel. Fuente [23]	25
2.4. Estructura básica de una infraestructura UMTS. Fuente [10]	27
2.5. Dependencias de requerimientos. Fuente [19]	34
2.6. Secuencia de pasos solución del problema de planeación en la india. Fuente [19]	36
2.7. Ejemplo de flujo de información en la herramienta IncrEase. Fuente [7]	38
3.1. Estructura metodología cascada. Fuente (Autores)	45
3.2. Diagrama sistémico modo de operación del algoritmo propuesto. Fuente (Autores)	54
3.3. Grafo $G$ . Fuente [7]	58
3.4. Valor presente Neto. Fuente [7]	59
3.5. Grafo $R$ . Fuente [7]	60
3.6. Lista $L$ . Fuente [7]	60
3.7. Grafo de los nodos Municipales conectados. Fuente (Autores)	80
3.8. Estructuras de datos utilizadas en el modo de operación Búsqueda estratégica (a) grafo $G$ , (b) grafo $R$ , (c) lista $L$ . Fuente [7]	81
3.9. Árbol $R$ resultado. Fuente (Autores)	82
3.10. Comparación con heurística simple. Fuente (Autores)	83
3.11. Ubicación de la red actual y ubicación de la futura expansión de la red. Fuente (Autores)	84
3.12. Mapa de calor, solicitud de cobertura Bosachoque. Fuente (Autores)	85
3.13. Ubicación de las Instituciones Educativas Rurales en el Sumapaz. Fuente (Autores)	86
3.14. Relieve de la región del Sumapaz. Fuente (Autores)	87
3.15. Mapa de calor solicitudes en la región del Sumapaz. Fuente (Autores)	88
3.16. Mapa de calor desempeño y ubicación de los usuarios actuales. Fuente (Autores)	89
3.17. Grafo inicial de la red. Fuente (Autores)	90
3.18. Radioenlaces propuestos para expandir la red. Fuente (Autores)	91



4.1. Radioenlaces propuestos para expandir la red. Fuente (Autores)	. . . .	92
4.2. Ruta con menor costo-calor. Fuente (Autores)	. . . . .	94
4.3. Grafo R. Fuente (Autores)	. . . . .	95

# Índice de tablas

3.1. Ficha bibliográfica para seleccionar los archivos de estudio.	42
3.2. Datos de entrada del algoritmo planteado por <i>Sen</i>	46
3.3. Datos de salida del algoritmo planteado por <i>Sen</i>	47
3.4. Datos de entrada del algoritmo planteado por <i>Bernardi</i>	47
3.5. Datos de salida del algoritmo planteado por <i>Bernardi</i>	47
3.6. Parametros de entrada del primer algoritmo de la aplicación, TC-Algo( $G,c$ ) <i>Rios</i>	47
3.7. Parametros de salida del primer algoritmo de la aplicación, TC-Algo( $G,c$ ) <i>Rios</i>	48
3.8. Parametros de entrada del segundo algoritmo de la aplicación, START-TC-Algo( $G,c$ ) <i>Rios</i>	48
3.9. Parametros de salida del segundo algoritmo de la aplicación, START-TC-Algo( $G,c$ ) <i>Rios</i>	48
3.10. Parametros de entrada del algoritmo propuesto	49
3.11. Parametros de salida del algoritmo propuesto	49
3.12. Requerimiento funcional de cobertura	49
3.13. Requerimiento funcional de la ubicación de los usuarios	50
3.14. Requerimiento funcional de las torres disponibles	50
3.15. Requerimiento funcional de la topología de la red	50
3.16. Requerimiento funcional del área de selección	51
3.17. Requerimiento funcional del área de selección	51
3.18. Requerimiento no funcional, desempeño del algoritmo	52
3.19. Requerimiento no funcional, procesamiento del computador	52
3.20. Requerimiento no funcional, lenguaje de programación	52
3.21. Tabla valores aleatorios de calor en los municipios	78
3.22. Tabla valores aleatorios del costo de cada nodo en los municipios	79
3.23. Nodos fuentes	79
3.24. Nodos objetivo	79
3.25. Ruta obtenida	79
3.26. Resultado valor de NPV de los nodos	80
3.27. Cantidad de estudiantes en las Instituciones Educativas Rurales de acuerdo con el Mapa de calor. Fuente (Autores)	89
3.28. Conexiones del grafo planteado en la figura 3.17	91

4.1. Nodos fuente en la implementación del algoritmo para expandir la red .	93
4.2. Nodos objetivo en la implementación del algoritmo para expandir la red	93
4.3. Resultado valor de NPV de los nodos de la implementación . . . . .	96

# Introducción

El acceso a Internet a través de las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) se ha convertido en un instrumento fundamental de desarrollo social, económico, político y cultural para los gobiernos y sociedades en todo el mundo, de ahí que, el acceso a Internet de banda ancha tiene impactos positivos en la sociedad, así mismo, contribuye de manera significativa al crecimiento económico en muchos aspectos, mejora la productividad, facilita la adopción de procesos de negocio eficientes, aumenta la innovación y mejora los procesos de funcionamiento en las empresas [1] lo que ha conllevado a un desarrollo digital.

Se debe agregar que, el desarrollo digital hace referencia a aspectos como Infraestructuras que faciliten el acceso universal, geográfico y social a las tecnologías; sector TIC respecto a la industria tecnológica existente; competencias digitales o nivel de alfabetización digital en un tiempo determinado; marco legal y regulatorio referente a normatividad, políticas y estrategias de las TIC; contenidos y servicios que incluye la oferta de servicios digitales [2].

En contraste con lo anterior, la falta de accesibilidad a Internet en zonas rurales se debe a que los Proveedores de Servicios de Internet (*Internet service provider*) ISP, tienen que desplegar su infraestructura en lugares donde probablemente no retornaran su inversión. Por otro lado, existen en la academia y en la industria herramientas de planeación de redes inalámbricas, sin embargo, estas no están disponibles o no son adecuadas para intercomunicar pequeñas comunidades. Es necesario recalcar que la planeación de redes inalámbricas es diferente en todos los lugares debido a las condiciones climáticas, a la ubicación geográfica y al nivel socio-económico de la población, de aquí se realiza la comparación entre tres países, India, Inglaterra y Colombia, ya que el primero es rural, el segundo es un país del primer mundo y el tercero es un país en vía de desarrollo.

Se realiza una investigación documental en dónde se encuentra que los autores *Bernardi, Rios y Sen* desarrollan herramientas de planeación de redes inalámbricas aplicadas en zonas distantes de difícil acceso. *Bernardi* diseña una herramienta denominada IncrEase enfocada en apoyar el despliegue de las redes inalámbricas por parte de pequeños proveedores de Internet, por su lado, *Sen*, enfoca su proyecto en diseñar un algoritmo que permita obtener un bajo costo en el despliegue de la infraestructura físi-

ca de la red, mientras que *Ríos* aplica el algoritmo planteado por [3] hallando la mínima altura de las torres disminuyendo el costo en la construcción de la topología de la red.

Se realiza entonces, un estudio que conlleva a analizar a fondo los parámetros de entrada, salida y funcionamiento de los algoritmos planteados por los autores mencionados, con el fin de generar una nueva herramienta a partir de la información analizada, que permita expandir la red libre ubicada en la vereda Bosachoque (Municipio de Fusagasugá) a la provincia del Sumapaz (Cundinamarca).

De igual modo, el objeto de este libro es presentar una herramienta para la planeación de redes inalámbricas en zonas rurales y a través de esta expandir la red libre de Bosachoque ubicada en la vereda Bosachoque del municipio de Fusagasugá a la provincia del Sumapaz departamento de Cundinamarca, obteniendo una topología con la mejor ruta para expandir la red en la región, considerando la mínima altura de las torres y la relación costo-beneficio, es decir, llevar conectividad a Internet a la mayor cantidad de población posible pero con un bajo costo de despliegue de la infraestructura física de la red.

En el capítulo 1 se declara el plantamiento del problema al que se le dará solución, seguido de los objetivos, justificación y alcances y limitaciones de este proyecto. En el capítulo 2 se encuentra el marco referencial y dentro de él los antecedentes, el marco teórico que evidencia temas de impacto como la brecha digital y su aplacamiento a través de las redes libres comunitarias, a su vez, también se genera el estado del arte en el que se realiza la comparación de la planeación de las redes inalámbricas rurales en India, Escocia y Colombia. En el capítulo 3 se desarrolla el diseño metodológico, en esta sección se implementa la metodología tipo cascada ya que nos permite diseñar el algoritmo de planeación de forma lógica y secuencial obteniendo resultados óptimos. Por último, en el capítulo 4 se evidencian los resultados obtenidos al implementar el algoritmo diseñado en la red libre de Bosachoque.

# Capítulo 1

## El problema

### 1.1. Planteamiento del problema

En Colombia, se puede apreciar la baja accesibilidad de banda ancha en zonas rurales, ya que de acuerdo con “Estado de la banda ancha en América Latina y el Caribe” dado por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe [4], menos del 10 % de esta población tiene accesibilidad a servicio de banda ancha en el territorio nacional. Además, se espera que para los próximos años la comisión de regulaciones de las comunicaciones aumente la capacidad del canal para las zonas rurales, para el año 2020: 1 Mbps a 10 Mbps de bajada y de 512 Kbps a 1Mbps [5], lo cual, si comparamos esto con los datos actuales que se tienen del ancho de banda en la red libre de Bosachoque [6], se puede evidenciar que no se alcanzara el nivel de banda ancha, por lo tanto, es necesario modificar la red, y para esto los Proveedores Inalámbricos de Servicios de Internet (*wireless Internet service provider*) WISP solo pueden tomar dos acciones para extender su cobertura, estas son expandir la red, o mejorar las áreas ya existentes. En ambos casos, estas acciones son limitadas por el presupuesto y solo un pequeño conjunto de acciones pueden ser ejecutadas.

La planeación de redes se convierte en un proceso fundamental para estos casos, además, existe gran cantidad de software para el planeamiento de redes inalámbricas, pero estas herramientas a menudo no están disponibles, ni tampoco son adecuados para comunicar pequeñas comunidades y pequeños WISP [7]. El difícil acceso a herramientas de planeación de redes inalámbricas limita la presencia de ISP en zonas rurales ya que ellos no saben con certeza cómo invertir en infraestructura que permita acceso a internet de banda ancha. Las comunidades excluidas de la banda ancha corren el riesgo de quedar al margen de toda una gama de aplicaciones y ventajas que proporciona Internet, dejando a un lado la posibilidad de generar un desarrollo económico [8].

¿Cómo planificar la expansión estratégica de la red libre de Bosachoque con un algoritmo de planeación de redes inalámbricas en zonas rurales?

### 1.1.1. Objetivos del estudio

#### Objetivo general

Diseñar un algoritmo para la planeación incremental de redes inalámbricas en áreas rurales aplicado en la red libre de Bosachoque

#### Objetivos específicos

- Generar el estado del arte de los algoritmos utilizados en la planeación de redes inalámbricas que permitan identificar y determinar los requerimientos del algoritmo que sugieran la mejor estrategia de expansión de una red
- Diseñar un algoritmo que permita identificar la mejor estrategia de expansión de la red inalámbrica en zonas rurales
- Evaluar el algoritmo mediante una simulación numérica, comparándolo con Heurística simple.
- Aplicar el algoritmo propuesto en la Red Libre de Bosachoque analizando la topología adecuada para futuras expansiones de la red en las Instituciones Educativas Rurales de la región del Sumapaz-Cundinamarca considerando la relación costo-beneficio.

### 1.1.2. Justificación

El acceso a Internet de banda ancha (conexión o acceso a Internet de alta velocidad) tiene impactos positivos en la sociedad, puesto que contribuye de manera significativa al crecimiento económico en muchos aspectos, ya que mejora la productividad, facilita la adopción de procesos de negocio eficientes, aumenta la innovación y mejora los procesos de funcionamiento en las empresas [1], por esta razón la Comisión de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de las Naciones Unidas mediante su informe “El acceso de banda ancha a Internet como medio de lograr una sociedad digital inclusiva” véase en [9], sugiere a todas las naciones miembros de la ONU (Organización de las Naciones Unidas) aumentar los esfuerzos para que todas las personas y comunidades tengan acceso a banda ancha. Sin embargo, la falta de accesibilidad a banda ancha en zonas rurales se debe a que los Proveedores de Servicios de Internet ISP, tienen que desplegar su infraestructura en lugares donde probablemente no retornaran su inversión, por esto, es importante planificar un óptimo despliegue de la red. En la actualidad, se encuentran software para la planeación de redes, sin embargo, están enfocadas a redes de banda ancha de telefonía móvil [10] y redes inalámbricas locales WLAN [11], mientras que para la planificación de redes de acceso inalámbrico o de banda ancha en zonas rurales estos enfoques se encuentran limitados.

Nuestro enfoque está basado en las necesidades de guiar a los WISP en áreas rurales que se enfrentan con el único reto de extender su rendimiento con inversiones estrechas en un ambiente de ganancias limitadas. La clave para tales organizaciones es identificar la estrategia de despliegue más económica para planear su red mientras se toma en consideración su cobertura. Por esto, en el presente proyecto, se propone el diseño de un algoritmo de optimización, que permita identificar el camino de solución de menor costo, seguido del desarrollo de un software que permita mostrar visualmente las posibles acciones a seguir, para finalmente, implementar el algoritmo en la red libre de Boschoque, en donde se evalúan los resultados.

### Beneficios tecnológicos

Se da a conocer una nueva perspectiva a los WISP en la planificación de redes BWA (acceso de banda ancha inalámbrico "Broadband Wireless Access) en zonas rurales, incentivando la conectividad y facilitando la accesibilidad a la banda ancha, además de tener acceso a la herramienta, puesto que se tiene previsto el desarrollo de un software libre, el cual está sujeto a actualizaciones o mejoras por parte de la comunidad tecnológica, además de fomentar la posibilidad de generar otras herramientas de software para la solución de problemas de optimización y planeación de redes.



## **Beneficios institucionales**

El desarrollo del proyecto permite a la Universidad de Cundinamarca contar con una herramienta que permita el planeamiento de redes rurales inalámbricas, fortaleciendo el desarrollo económico y tecnológico de la comunidad rural de la vereda Bosachoque en el municipio de Fusagasugá y demás lugares donde esta herramienta se pueda implementar, también permite mejorar el servicio como WISP, que presta la Ucundinamarca en la red libre de Bosachoque. De igual forma, contribuye al fortalecimiento del semillero de investigación Kinestasis, fomentando el desarrollo de herramientas tecnológicas al servicio de la sociedad.

## **Beneficio social**

La herramienta permite sugerir las mejores decisiones al momento de planear una red inalámbrica o mejorar la cobertura de Internet de banda ancha, llevando consigo un desarrollo económico, dado que la comunidad puede tener a su disponibilidad acceso a herramientas tecnológicas a través de la conectividad a Internet que permitan fortalecer el sector rural y así contribuir a la disminución de la brecha digital que existe en los países en vía de desarrollo.

### **1.1.3. Alcances y limitaciones**

#### **Alcances**

En el presente proyecto se diseña un algoritmo para la planeación incremental de redes inalámbricas que permite sugerir las mejores opciones para incrementar la cobertura de una red inalámbrica y acceso a internet en zonas rurales. Este algoritmo se implementa y evalúa en la red libre de Bosachoque. Esta herramienta permite la toma de decisiones al momento de planificar la expansión de la red. El proyecto plantea la base para desarrollar futuros trabajos en el campo de las redes y las telecomunicaciones.

#### **Limitaciones**

El proyecto está limitado por la infinidad de soluciones válidas para realizar la planeación incremental de una red (conexión de todos los nodos), ya que, se pueden generar problemas de algoritmos como bucles infinitos, NP-hard, entre otros. En la evaluación se tiene limitaciones en cuanto a infraestructura disponible para desplegar torres nuevas, nodos nuevos, ampliación de nodos, y demás acciones sugeridas por la herramienta.

# Capítulo 2

## Marco referencial

### 2.1. Antecedentes

El acceso a Internet a través de las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) se ha convertido en un instrumento fundamental de desarrollo social, económico, político y cultural para los gobiernos y sociedades en todo el mundo, lo que ha conllevado a un desarrollo digital.

El desarrollo digital hace referencia a aspectos como infraestructuras que faciliten el acceso a las tecnologías; sector TIC respecto a la industria tecnológica existente; competencias digitales o nivel de alfabetización digital en un tiempo determinado; marco legal y regulatorio referente a normatividad, políticas y estrategias de las TIC; contenidos y servicios que incluye la oferta de servicios digitales [2].

Aunque la era digital es un fenómeno mundial existente en países más desarrollados que otros, conlleva a la denominada brecha digital que es la ausencia de una o varias dimensiones contenidas en el desarrollo digital, es esta entonces un reto para la sociedad de la información.

Una alternativa para disminuir la brecha digital, son las Redes Libres Comunitarias (RLC), entendidas no solo como redes de computadores sino como redes comunitarias implementadas en poblaciones vulnerables donde el acceso a la información es una posibilidad y no una realidad [12].

Debido a que las redes comunitarias por lo general se encuentran desplegadas en áreas geográficas de difícil acceso, se utilizan tecnologías inalámbricas como mesh y radioenlaces usando bandas libres como la de 2,4 GHz; estas tecnologías son ampliamente utilizadas en áreas rurales, ya que, por cuestiones de acceso e infraestructura, las tecnologías cableadas no resultan ser viables para estos casos, dando como solución las redes inalámbricas comunitarias [13]. Además, en este tipo de redes, se emplean materiales que pueden ser adquiridos por la comunidad facilitando la realización de las conexiones inalámbricas.

En varias partes del mundo se pueden encontrar diferentes redes comunitarias, un

ejemplo bastante significativo y de gran éxito es la red Guifi.net, que comenzó en 2004 en la comarca de Osona (Catalunya, España), este es un proyecto tecnológico, social y económico, impulsado por la ciudadanía que tiene por objetivo la creación de una red de telecomunicaciones abierta, libre y neutral, basada en un modelo de procomún [14]. Guifi.net tiene a la fecha de diciembre de 2016, 32.500 nodos activos y se calcula que más de 50.000 personas reciben servicio de Internet gracias a esta red.

A pesar que gran parte de los nodos están conectados con tecnología WiFi en Guifi.net, también utiliza tecnología cableada y de fibra óptica, debido a que se desarrolló en gran parte en zonas urbanas, sin embargo como ya hemos mencionado, las RLC ha tenido gran participación en zonas rurales, en este enfoque se destaca una red inalámbrica mesh (*wireless network mesh*) WMN, desplegada por la universidad de Lancaster en Wray (Inglaterra), proporcionando servicio de Internet a una villa en un área aproximada de dos kilómetros por un periodo de tres años [15].

En el ámbito local, en Bogotá se han desplegado diferentes redes inalámbricas comunitarias, dentro de estas se resalta que a pesar de no estar en un entorno rural, refleja la forma de cómo se puede hacer inclusión social a sectores populares, en esta aparece [16], una red desplegada desde la Universidad Francisco José de Caldas, la cual muestra desde el proceso de selección de puntos donde se desplegaron los nodos, hasta la evaluación de los resultados después de su despliegue; en esta investigación se logró ampliar la cobertura en más de 40 % con el uso de antenas artesanales, utilizando guías y herramientas propuestas por [13], demostrando, que la participación de la ciudadanía es fundamental para el éxito de estas redes.

### 2.1.1. Descripción de la red libre de Boschoque

La Red Boschoque Libre es un macroproyecto misional de investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cundinamarca (Redes libres como alternativa de innovación social e inclusión digital en la vereda Boschoque del municipio de Fusagasugá), con el fin de proveer servicio de Internet a la vereda Boschoque utilizando conexiones inalámbricas, dado que, por ser una zona rural, una conexión cableada sería costosa y difícil. Esta red, se implementó con el fin de generar a la comunidad una herramienta que permita la conectividad, fomentando el desarrollo y crecimiento de esta, utilizando las tecnologías, protocolos y herramientas típicas de una red inalámbrica en países en desarrollo. El proceso de cómo se planeó esta red se encuentra documentado en [17].

La red de Boschoque fue planeada e implementada como una BWA de dos niveles, nivel de backhaul donde de manera inalámbrica se adquiere el servicio de Internet y nivel de acceso donde se conectan los usuarios finales. El nivel backhaul hace referencia a los sitios de transmisión que están interconectados usando enlaces inalámbricos punto a punto de larga distancia (PTP), mientras que el nivel de acceso proporciona conectividad al equipo del cliente (CPE) a través de un enlace punto multipunto



## 2.2. Marco Teórico

### 2.2.1. Brecha Digital

En el año 1995 eclosionan para la población dos tecnologías totalmente disruptivas, Internet y la telefonía móvil, ellas sugieren una nueva revolución, la llamada revolución digital, que a su vez crea la sociedad de la información (S.I), dando inicio al planteamiento sobre cómo medir y modelizar la S.I, el nivel de desarrollo digital y el impacto del desarrollo digital en el ser humano. De igual manera, el acceso a Internet a través de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) ha tenido un auge exponencial en los últimos años, en efecto, este avance se presenta en países desarrollados o zonas metropolitanas de países en desarrollo [19], sin embargo, existen unas comunidades con poco o ningún acceso a las TIC [2] y otras con acceso casi universal a telefonía fija, móvil e Internet de banda ancha, es así que resulta el concepto de **brecha digital** entendiéndose como la ausencia de una o varias dimensiones contenidas en el desarrollo digital. En relación con lo anterior, las poblaciones sin acceso a las TIC poseen un bajo nivel socioeconómico, viven en zonas de difícil con ineficiencia o inexistencia de redes eléctricas, al mismo tiempo, las personas que viven en áreas rurales sufren el efecto de la brecha digital incluso más fuerte que los habitantes urbanos, debido a que no pueden acceder a servicios como el aprendizaje a distancia, la salud y el comercio electrónico [7].

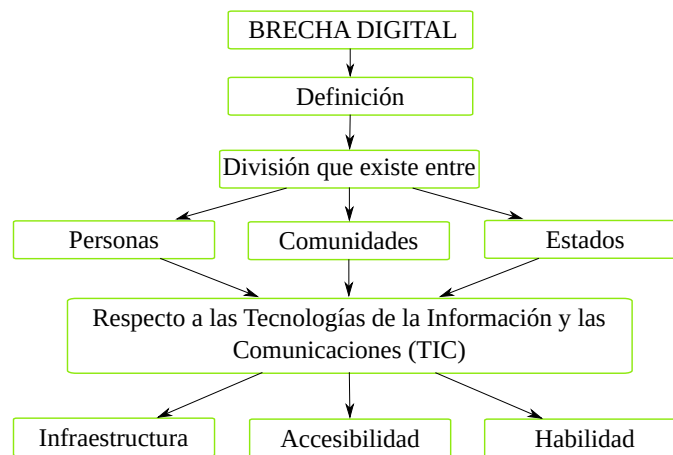


Figura 2.2: Brecha Digital. Fuente (Autores)

La figura 2.2 enmarca la definición de Brecha Digital en donde se aprecia que es la separación entre personas, comunidades y estados que tienen o no acceso a las Tecnologías de las Información y las Comunicaciones debido a la falta de infraestructura, difícil acceso a zonas apartadas de centros poblados y su nivel de alfabetización digital.

## Redes Libres Comunitarias

Una alternativa para disminuir la brecha digital, son las Redes Libres Comunitarias (RLC), entendidas no solo como redes de computadores sino como redes comunitarias implementadas en poblaciones vulnerables donde el acceso a la información es una posibilidad y no una realidad [12]

Una red libre comunitaria, es una red troncal, dividida en subconjuntos de redes construidas y gestionadas de manera colectiva por la comunidad, la cual se involucra en la red de forma activa y participativa.

## Principios generales

- Libertad de utilizar la red para cualquier propósito mientras no se perjudique el funcionamiento de la propia red, la libertad de otros usuarios, y se respete las condiciones de los contenidos y servicios que circulan libremente.
- Libertad de conocer cómo es la red, sus componentes y su funcionamiento, también se puede difundir su espíritu y funcionamiento libremente.
- Libertad para incorporar servicios y contenidos a la red con las condiciones que se quiera.
- Libertad de Incorporarse a la red y ayudar a extender estas libertades y condiciones. [14]

## Características de RLC

- Abiertas: porque todo el mundo tiene el derecho a conocer la forma en que se construyen.
- Libres: ya que el acceso a esta red está impulsado por un principio de no discriminación, por lo que son de acceso universal.
- Neutrales: porque cualquier solución técnica disponible se puede emplear para ampliar la red, y porque la red se puede utilizar para transmitir datos de cualquier tipo por cualquier participante, incluyendo también fines comerciales [14].

Debido a que las redes comunitarias por lo general se encuentran desplegadas en áreas geográficamente separadas, se utilizan tecnologías inalámbricas como mesh y radioenlaces usando bandas libres como la de 2,4 GHz; las tecnologías inalámbricas son ampliamente utilizadas en áreas rurales, ya que, por cuestiones de acceso e infraestructura, las tecnologías cableadas no resultan ser viables para estos casos, dando como solución las redes inalámbricas comunitarias en donde ya se han realizado trabajos importantes como se muestra en [13].

## Planeación de Redes Inalámbricas

Una red inalámbrica consiste en la interconexión de varios nodos entre sí mediante la transmisión y recepción de señales electromagnéticas sin ninguna guía, empleando como medio el aire o el espacio vacío. La planificación de redes supone la definición de requisitos para la creación de una infraestructura que permita conectar estos sistemas a través de una red [20], se debe agregar que, la planeación de redes inalámbricas es un área muy activa por la comunidad científica, sin embargo, el foco de las investigaciones son las redes de banda ancha móvil y redes de área local inalámbrica.

**Factores clave de la planeación** A continuación, se detallan factores claves de la planeación de redes inalámbricas.

- Costos de despliegue: valor inicial de instalación de la red.
- Costos de implementación: coste del mantenimiento y funcionamiento de la red.
- Expansión de la red: crecimiento de la red, abarcando más territorio.
- Cobertura de la red: área geográfica que cubre la red.
- Capacidad de la red: ancho de banda requerido para la transferencia de datos.
- Retorno de la inversión: beneficio obtenido en relación a la inversión realizada.

## Algoritmos utilizados en la planeación

Aunque existen estructuras de algoritmos para solucionar problemáticas en la planeación incremental de redes inalámbricas [21] proporcionan información acerca de los enfoques propuestos para el diseño de redes, que muestran la evolución de modelos y técnicas para la planificación automática de servicios inalámbricos celulares, cabe resaltar que la documentación existente hace énfasis en redes móviles, sin embargo, este concepto es aplicable para el despliegue de redes inalámbricas rurales. Dicho lo anterior, [21] facilita la descripción de diferentes clases de algoritmos que se pueden usar para realizar la planeación de redes inalámbricas.

- **Algoritmos voraces**

Es una estrategia de búsqueda por la cual se sigue una heurística consistente en elegir la opción óptima en cada paso local con la esperanza de llegar a una solución general óptima. El procedimiento central del algoritmo voraz apunta a asignar las mejores ubicaciones posibles a un conjunto dado de estaciones base activas.



### ■ Algoritmos genéticos (GA)

Estos algoritmos imitan algunos de los procesos de evolución y selección natural al mantener una población de soluciones candidatas que están representadas por una cadena de genes (con frecuencia binarios). Con el tiempo, la población evoluciona a través de procesos que emulan procesos biológicos como la reproducción. Los miembros de la población se combinan para producir descendientes. El concepto básico es que los fuertes tienden a adaptarse y sobrevivir, mientras que los débiles tienden a desaparecer. En la planeación de redes se utiliza la optimización de varios objetivos, estos se conocen como optimización multiobjetivo, en la que existe más de una solución óptima con respecto a todos los objetivos [21], entre ellos lugar de instalación de una torre, configuración de una antena, asignación de altura, etc.

### ■ Búsqueda tabú (TS)

La búsqueda tabú es un algoritmo heurístico de nivel superior para resolver problemas de optimización combinatoria. Es un procedimiento de mejora iterativo que comienza a partir de cualquier solución inicial y trata de determinar una mejor solución. TS (por sus siglas en inglés *tabu search*) se caracteriza por su capacidad para evitar el atrapamiento en la solución óptima local y para evitar los ciclos, utiliza una memoria visible del historial de búsqueda. Normalmente, el algoritmo TS comienza sin conocer la solución correcta, dependiendo completamente de las respuestas del entorno que interactúa para llegar a la solución óptima [22]. Este algoritmo permite encontrar una ubicación de las torres en la fase de planeación para lograr un óptimo rendimiento de la red.

## Representación de la topología

Topología se refiere a la configuración de la red, es decir, a su forma de conectividad física en la que los dispositivos intercambian datos entre sí.

Para diseñar la infraestructura de la topología de red requerida, es necesario describir la topología por medio del uso de grafos ya que es a través de esta estructura de datos que se elabora el procesamiento computacional del problema [23]

**Grafo** Un grafo en el ámbito de las ciencias de la computación es un tipo abstracto de datos (TAD), que consiste en un conjunto de nodos (también llamados vértices) y un conjunto de arcos (aristas) que establecen relaciones entre los nodos. Formalmente se representa mediante el par  $G = (V, A)$ , dónde:

- $V$  es un conjunto de objetos llamados vértices o nodos.
- $A$  es un conjunto de objetos denominados aristas o arcos.

- Las aristas representan relaciones entre los vértices, de forma que una arista es un par  $(u, v)$  de vértices que pertenecen a  $V$ , para determinar que nodos se pueden unir, se debe tener en cuenta una zona que debe estar libre de obstáculos llamada zona de Fresnel.

### Zona de Fresnel

Se busca mantener la línea de vista despejada de toda obstrucción. De manera que, al establecer el enlace, definido por una línea recta que une las dos antenas, este no se vea afectada por ningún obstáculo. Además, se debe despejar de toda obstrucción un área elíptica conocida como la primera zona de Fresnel. Con esto se garantiza que las pérdidas por difracción sean minimizadas.

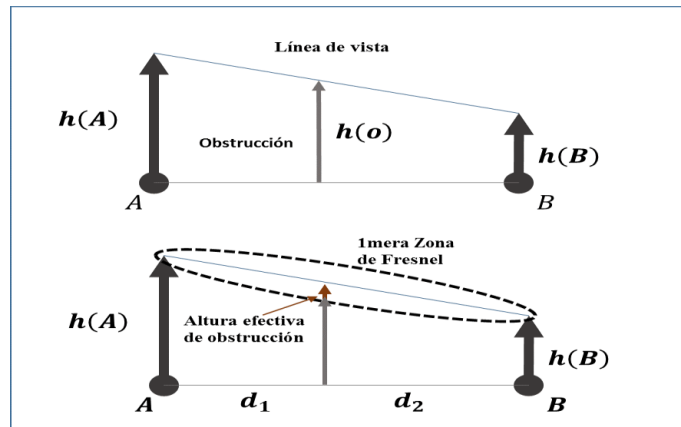


Figura 2.3: Zona de Fresnel. Fuente [23]

El radio de la zona de Fresnel  $n$ , es denotado por  $r_n$  es expresado en función de  $n$ , las distancias  $d_1$  y  $d_2$  y la longitud de onda  $\lambda$  como

$$r_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{(d_1 + d_2)}} \quad (2.1)$$

### Herramientas de manipulación de grafos

- Python

Python es un lenguaje de programación multiparadigma, ya que soporta orientación a objetos, programación imperativa y, en menor medida, programación funcional. Además, por ser un lenguaje de programación de licencia libre, se han desarrollado un gran número de paquetes, librerías y Framework que permite trabajar un sinnúmero de

aplicaciones, entre estas se encuentra Networkx.

## **NetworkX**

NetworkX es un paquete de Python para la creación, manipulación y estudio de la estructura, dinámica y funciones de redes complejas.

NetworkX proporciona:

- Herramientas para el estudio de la estructura y dinámica de redes sociales, biológicas y de infraestructura;
- Una interfaz de programación estándar e implementación de gráficos que es adecuada para muchas aplicaciones;
- Un entorno de rápido desarrollo para proyectos colaborativos, multidisciplinarios;
- Una interfaz para los algoritmos numéricos existentes y el código escrito en C, C++ y FORTRAN;
- La capacidad de trabajar con grandes conjuntos de datos no estándar.

NetworkX permite cargar y almacenar redes en formatos de datos estándar y no estándar, generar muchos tipos de redes aleatorias y clásicas, analizar la estructura de la red, construir modelos de red, diseñar nuevos algoritmos de red, dibujar redes entre otros. [24].

## 2.2.2. ESTADO DEL ARTE

### Planeación de redes móviles UMTS

En [10], se presenta una literatura detallada de los problemas que se presentan en la planeación de la topología celular 3G, la cual está basada en el Sistema universal de telecomunicaciones móviles **UMTS** (“*Universal Mobile Telecommunications System*”); para entender las dificultades que se presentan en la planeación, es importante hacer una pequeña descripción de la arquitectura UMTS.

Una arquitectura típica de UMTS se muestra en la figura (1), donde se observa que una red UMTS está dividida en dos partes: la *red de acceso* y la *red de núcleo*. La primera, es también llamada red UMT de radio terrestre **UTRAN**, la cual está compuesta por muchos subsistemas de red de radio **RNS** (“*radio network subsystem*”). Cada RNS contiene un controlador de red de radio **RNC** (“*radio network controller*”) y una o más estaciones bases **BS** (“*base station*”).

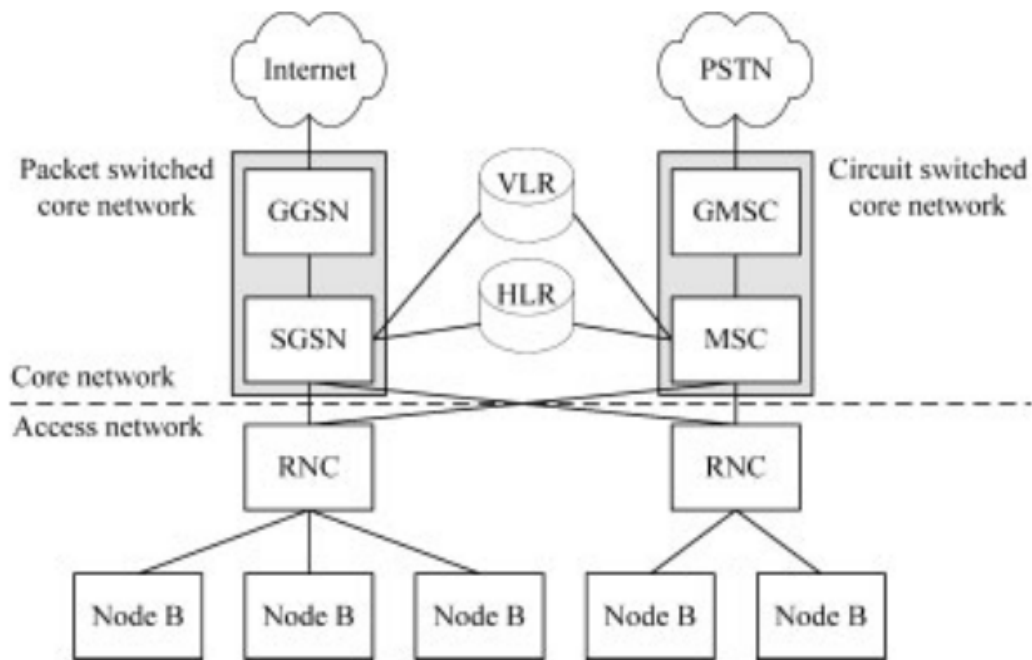


Figura 2.4: Estructura básica de una infraestructura UMTS. Fuente [10]

Las estaciones bases (en este caso son los *nodos B*) son usados para transmitir/recibir radiofrecuencia hacia/desde los usuarios móviles, mientras que las RNC se ocupa de los recursos y la gestión de tráfico de datos. El principal objetivo de la UTRAN (“*UMTS*

*Terrestrial Radio Access Network*”) es hacer el enlace entre los usuarios móviles y el núcleo red.

**Planeación de Celda** El autor *Hitlarie*, descompone la planeación de las redes móviles de manera modular, con el fin de reducir la complejidad y los divide en los siguientes subproblemas:

- Subproblemas de planeación de celdas.
- Subproblemas de planeación de red de acceso.
- Subproblemas de planeación de núcleo de red.

La parte de los subproblemas que se necesita abordar con más detalle, son los de planeación de celdas, ya que se asemeja más al enfoque que se necesita en la planeación de redes inalámbricas de banda ancha; a continuación, se describe dicho subproblema, así como algunos trabajos que se han realizado.

**Subproblemas de planeación de celdas** El problema inicial de planeación es cubrir todos los usuarios móviles en un área determinada con el número mínimo de BSs. En la planeación de celdas se encarga de resolver los siguientes ítems:

- Optimizar el número de BSs.
- Mejor localización para instalar BSs.
- Escoger el tipo o modelo de BSs.
- Configuración (altura, orientación, potencia, etc).
- Asignación de usuarios móviles a la BS.

Los problemas de planeación pueden variar dependiendo en la planeación de red objetivo. Usualmente, en la planeación de red se requiere:

- Minimizar los costos de la red.
- Maximizar la calidad de la señal.
- Maximizar el área de cobertura.

Sin embargo, esto puede ser contradictorio, ya que, por ejemplo, si se quiere maximizar la cobertura se necesitarán desplegar más BSs y esto por supuesto, aumentara los costos. Al principio, la planeación de redes inalámbricas se realizaba teniendo en cuenta la predicción de la señal, sin embargo, en las redes UMTS, la planeación de radio no puede ser solo basado en la predicción de la señal, sino que se deben tener en cuenta la distribución de tráfico. En esta parte aparece gran cantidad de literatura del autor Amaldi, en [25], el autor contextualiza que en la planeación de radio en el Sistema Global para las Comunicaciones Móviles GSM (“*Global System for Mobile communications*”) se realizaba en dos fases, la fase de planeación de cobertura donde se define la mejor localización de las BSs teniendo en cuenta los modelos de propagación y la fase de planeación de frecuencia, que define el número de canales para cada BS teniendo en cuenta la calidad de la señal de interferencia de radio SIR (“*Signal-to-Interference Ratio*”).

Sin embargo, teniendo en cuenta el Acceso Múltiple por División de Código de Banda Ancha W-CDMA (“*Wideband Code Division Multiple Access*”), esto ya no se puede realizar en estas dos fases, debido a que el ancho de banda es compartido por todas las conexiones activas y no por la frecuencia asignada, así como también el área de cobertura de cada BS es afectada por la cantidad de tráfico.

Para la planeación de celdas, se tiene en cuenta los parámetros de calidad de la SIR, en el cual se define una SIR mínima, el cual depende de la potencia recibida; Esta depende de la potencia transmitida y las atenuaciones de señal en la propagación, por ende la potencia transmitida se puede ajustar para minimizar la interferencia, aquí aparece un concepto importante, el cual es el control de potencia PC (“*power control*”), en donde se ajusta la potencia de transmisión para cumplir dos objetivos, la potencia objetivo recibida  $P_{tar}$  y la SIR objetivo  $SIR_{tar}$ . En este artículo Amaldi propone un modelo de programación matemática, que ayuda en la decisión de planear redes móviles, teniendo en cuenta la mejor localización y configuración de las BSs, teniendo en cuenta el modelo de propagación *Hata*, donde se ajusta el PC y este a su vez es probado con un algoritmo aleatorio voraz, el cual añade o remueve BSs de la topología; En este artículo se describe el rendimiento de esta solución dando resultados óptimos y también demuestra que este problema es un problema típico de NP-hard. Este trabajo se resalta por ser pionero en la planeación de celdas.

En la planeación de redes, a menudo se utiliza la optimización de varios objetivos, más conocido como optimización multiobjetivo, el cual es diferente de una optimización simple, puesto que aquí solo importa optimizar un parámetro, dando como resultado el mejor diseño o la mejor optimización, teniendo en cuenta un máximo o un mínimo global que dependerá del objetivo de la optimización (maximizar o minimizar), sin embargo, en la optimización multiobjetivo existe más de una solución óptima con respecto a todos los objetivos; aquí, el objetivo consiste en encontrar un óptimo de Pareto, el cual nos dice que una solución es óptima cuando no existe otra solución tal que mejore en un objetivo sin empeorar al menos uno de los otros.

Como se ha visto anteriormente, en la planeación se pueden abordar diferentes objetivos (lugar de instalación de BS, configuración, altura, potencia, etc.), sin embargo, al momento de planificar la red, atacar todos los problemas al tiempo es un problema complejo, por esto, se han venido implementando algoritmos multiobjetivo, generalmente para estos casos se han venido desarrollando algoritmos genéticos AG, en el trabajo de [26], los autores recolectan cuatro estados del arte de algoritmos genéticos multiobjetivo, donde los ponen a prueba para planificar una red aumentando la cobertura teniendo en cuenta los costos y los comparan teniendo en cuenta su desempeño en ciertas pruebas sintetizadas; los autores toman como referencia los algoritmos: **SPEA2**, **NSGAI**, **PGSA** y **SEAMO**. A continuación, se hará una breve descripción de cada uno.

- **SPEA2** (*The Strength Pareto Evolutionary Algorithm version II*)

La población inicial es sometida a una función de adecuación (“Fitness Function”), donde se escoge el valor individual más apto o el más “fit” de la unión del archivo y la población hija. El valor de la función de adecuación está dado por la suma de dos partes: cuantas soluciones domina (“raw fitness”) y la *densidad estimada*, el cual es la proximidad de otras soluciones en el espacio objetivo. Cada generación  $n$  es guardada en el archivo, en donde es de nuevo aplicado el operador a la nueva generación; Este proceso se repite hasta terminar el proceso.

- **NSGA II**

El individuo más apto está determinado por la unión del archivo y la población hijo, determinado por mecanismos de clasificación compuesto de dos partes. La primera parte está compuesta al determinar la capa de soluciones que no son dominadas, es decir, las que están más cerca al frente de Pareto. La segunda parte es una medida de dispersión, determinada por la distancia de hacinamiento crowding distance), el cual se escogerá el que tenga menor hacinamiento, puesto que esto significa que tendrá más población cubierta y la solución será más diversificada. Este proceso se repetirá  $n$  repeticiones, guardando el valor de los dos resultados y repitiendo lo mismo con las nuevas generaciones, hasta que el algoritmo finalice.

- **PESA** (*The Pareto Envelope-based Selection Algorithm*)

A diferencia de los dos algoritmos anteriores, el *PESA* no tiene un tamaño de archivo fijo y solo permite que las soluciones no dominadas sean miembros, por ende, es más limitado. Si el archivo excede el tamaño de  $n$  soluciones, un factor de compresión o factor *squeeze*, es calculado para todos los miembros del archivo. El factor de compresión es el total de miembros en una subregión en una cuadrícula (las que están en el espacio de búsqueda, dentro de la subregión). El factor de compresión más alto es el que tenga más vecinos locales en una solución. Los miembros aleatorios de la región de la cuadrícula

con el factor de compresión más alto se eliminan hasta que se reduce el tamaño del archivo a  $n$ . Los operadores genéticos son aplicados en los miembros del archivo a una nueva población hijo. Este proceso se repite hasta la finalización.

- **SEAMO** (*Simple Evolutionary Algorithm for Multi-objective Optimization*)

La principal diferencia entre SEAMO y otro algoritmo, es que este es de estado estable y solo mantiene una población (de un tamaño constante  $n$ ). La principal ventaja del algoritmo SEAMO es su simplicidad, el cual usa la disposición de todos los mecanismos de selección basado en fitness o rango. El avance de la búsqueda está definido por tres simples reglas:

- los padres solo son remplazados por su propia descendencia.
- Las poblaciones duplicadas son eliminadas.
- La descendencia solo puede reemplazar a los padres si es superior: elitismo.

Los operadores genéticos se aplican a cada padre para formar un nuevo hijo, que se considera para la sustitución en la población de padres según las tres reglas. Este proceso se repite hasta la terminación.

El aspecto clave de este marco es un decodificador que utiliza un orden de ubicaciones de sitios candidatos para construir una celda. En este trabajo se concluyó que los algoritmos son similares en sus resultados en términos reales, sin embargo, se encuentran algunas diferencias, el **NGSA-II** y **SPEA2**, tienen resultados similares en cuanto al rendimiento, el algoritmo **PESA** generalmente obtiene ligeramente una baja calidad en el conjunto de soluciones, pero en cuanto a la velocidad de convergencia y distribución de soluciones tiene el mejor desempeño. En cuanto a **SEAMO**, se destaca por su simplicidad, su elegancia conceptual, su fácil implementación y su velocidad de ejecución, pero su simplicidad impide tener calidad en cuanto a la distribución de las soluciones obtenidas y en el bajo rendimiento en los factores medidos en el desarrollo del test. Para finalizar el trabajo, los autores determinaron que el algoritmo **NSGA-II** tiene el mejor rendimiento, siendo el que mejor se podría implementar en la planeación de celdas ya que obtuvo los mejores resultados de calidad en las soluciones obtenidas.

## Redes WiMAX

En la planeación de celda, se han realizado trabajos con la tecnología 802.16e o WiMax; el autor [27], presenta un marco de referencia de optimización multiobjetivo que resuelve uno de los principales problemas dentro del diseño inicial de redes de acceso móvil, el cual es encontrar el mejor sitio de instalación de BSs dentro de un conjunto de lugares posibles.



La forma en que le autor trabaja la planeación de la red, consiste en que primero se realiza una predicción de la señal; aquí se tiene en cuenta el tráfico de diferentes sitios candidatos posicionados aleatoriamente en diferentes áreas geográficas, en esta fase evidencia las densidades de tráfico entre áreas rurales y áreas urbanas. Una vez se ha definido este modelo de tráfico, para realizar las funciones de costos, el autor realiza una función de costos en la cual tiene en cuenta el punto de equilibrio entre los diferentes factores que se presentan en el diseño de una red, los cuales son:

- Área de cobertura.
- Interferencia.
- Rendimiento.
- Rentabilidad de la operación de la red.
- Equipamiento y otros costos.

La función de costos está dividida en dos partes, una consiste en una función que tiene en cuenta los parámetros técnicos de rendimiento que debe tener la red, como son el ancho de banda para establecer videoconferencias, Voz IP, servicios en la red, etc., calidad de servicios QoS que deben tener los usuarios, entre otros. La otra función de costos está contemplada por todos los parámetros de rentabilidad que debe tener la red, para que la solución sea adecuada para los proveedores de internet, en esta se tiene en cuenta la rentabilidad de la red menos los costos de funcionamiento.

Una vez calculado estas funciones de costos, el paso a seguir es realizar la optimización multiobjetivo de los parámetros anteriormente analizados, esto se hace mediante el marco de referencia, en donde se va realizando la simulación de la red con la herramienta de planeación *ForsK's Atoll*, donde posteriormente se va a realizar una técnica de optimización con el algoritmo búsqueda tabú, donde el autor, modifica el algoritmo para buscar la solución multiobjetivo, una vez realizado esto, se van graficando las soluciones, con el fin de mostrarlas en el óptimo de Pareto. Este procedimiento se realiza  $n$  veces, donde en cada iteración, se realiza la técnica de optimización y se hace el ajuste correspondiente a la solución, donde se vuelve a simular, esto se hace hasta encontrar una solución óptima.

En el trabajo de *Gordejuela*, se realizó la implementación de este marco de referencia de optimización multiobjetivo, donde se tuvo en cuenta como criterio de planeación una cobertura basada en QoS, lograr reducir al mínimo la interferencia y los costos de ubicar un conjunto de 20 BSs, luego se muestran los resultados de 600 iteraciones y se demuestra que el marco de referencia ha contribuido a un mejor resultado con respecto a la solución sin planeación y que además tiene en cuenta factores económicos que se pueden ajustar según las necesidades del proveedor de la red, dando como resultado una herramienta de optimización flexible y ofreciendo en este caso una comprensión detallada de cómo se puede hacer la planeación óptima utilizando redes WiMax.

## Redes BWA en zonas Rurales

Una opción para desarrollar las redes inalámbricas son las redes de banda ancha inalámbricas, BWA (Broadband Wireless Access) ya que es una tecnología que proporciona acceso a Internet inalámbrico de alta velocidad a una red de equipos en un área de cobertura amplia. [28].

En la planeación de redes BWA en áreas rurales, destacan los autores *Sen* [29], *Bernardi* [7] y *Ríos* [2]. Quienes, realizaron sus trabajos en India, Escocia y Colombia, respectivamente. Cada uno de ellos propone una planeación de redes teniendo en cuenta su país de origen y priorizando las necesidades, requisitos y restricciones que se tienen en cada uno de ellos.

## Redes BWA en la India

El autor *Sen* se enfoca específicamente en la planeación de redes de banda ancha en áreas rurales, en su tesis [29] trabaja sobre una red desplegada en el distrito de Andhra del Oeste de Godavari Pradesh. La India es un país donde la mayoría de la población vive en áreas rurales (66 % según el Banco Mundial) y esta hace parte de la brecha digital, esto se resuelve dando conectividad a todas las aldeas y pueblos. Lograr esto expandiendo la red actual de telefonía fija en zonas rurales no es factible teniendo en cuenta los costos elevados de la instalación de la infraestructura inicial, sin embargo, este caso no ocurre en la telefonía móvil, donde la demanda de usuarios es más densa y por ende se considera un modelo de negocio, puesto que se retribuye la inversión teniendo en cuenta la cantidad de usuarios dispuestos a pagar por este servicio.

El problema en las zonas rurales radica en que tienen baja densidad de usuarios y grandes distancias entre grupos de usuarios, esto conlleva a que compañías de telecomunicaciones o proveedores de Internet (ISP) vean poco atractiva la inversión en estos lugares debido al costo inicial de infraestructura y despliegue de la red y bajo retorno de su inversión.

El autor resuelve el problema teniendo en cuenta una serie de dependencias, en las cuales están ilustradas en la figura [2.5].

A continuación, se explicarán cada una de estas dependencias:

- La tasa de transferencia de datos depende de la MAC

El rendimiento requerido se logra dependiendo del protocolo MAC que se esté implementando, en este caso, el autor propone utilizar el protocolo de capa de Enlace de Datos 2P, puesto que en comparación con los protocolos más utilizados como TDMA y CSMA/CA, este tiene una capacidad de transferencia más elevada [30]

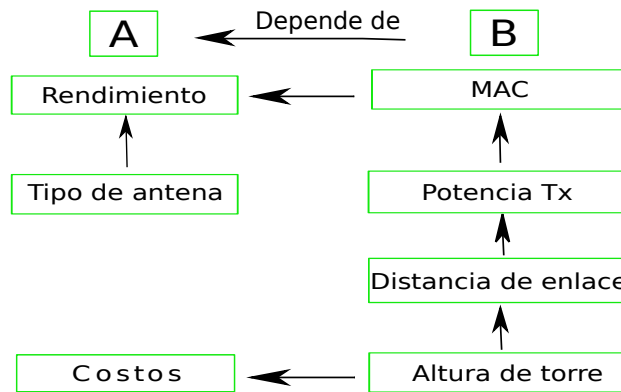


Figura 2.5: Dependencias de requerimientos. Fuente [19]

- La velocidad de transmisión depende del diseño físico de la red

El rendimiento depende del tipo de enlace, Punto a Punto (PTP) ó Punto Multipunto (PMP), puesto que si es PTP se usa todo el rendimiento permitido por la MAC, en cambio sí es PMP el rendimiento permitido por la MAC se divide entre los enlaces que están conectados, de esta manera el protocolo de enlace de todos tendrá que conmutar entre los enlaces existentes reduciendo el rendimiento del protocolo MAC.

- La potencia de transmisión depende del tamaño del enlace

La señal transmitida tendrá una degradación en su intensidad, dependiendo de la distancia del enlace. Cada antena tiene una ganancia específica, consiste en la relación de densidad de energía que radia en una dirección específica.

- La MAC depende de la potencia de transmisión

Esto es específicamente para el protocolo MAC 2P, en el que múltiples enlaces pueden operar simultáneamente. La operación simultánea de múltiples enlaces requieren que se asegure que la relación de potencias de la señal real y de la interferencia (SIR) sea mayor que un margen especificado por el sistema.

- La Altura de la torre depende del tamaño del enlace

La formación de un enlace Wifi entre dos nodos distanciados está basada en L.O.S. el cual debe tener despejado el 60% de la curvatura de la zona de Fresnel. El tamaño de la zona de Fresnel dependerá de la distancia del enlace.

- Los costos de despliegue dependen de la altura de las torres

Los costos de despliegue dependen principalmente del tamaño de la torre que se van a implementar. Los costos de la torre crecen linealmente con la altura de la torre, así que en este punto se debe considerar que se debe diseñar la topología de tal forma que la altura sea la mínima, esto ahorrará los costos principales del despliegue de una red.

Una vez se ha visto como se divide el problema, el autor sugiere resolver las dependencias con una secuencia de pasos como se muestra en la figura [2.6](#). Estos pasos son:

- **Topología de Búsqueda:**

Explorar el espacio de búsqueda para encontrar la topología de la red, se hace uso del algoritmo Branch-and-bound (Algoritmo de ramificación y límite), con ello se construye la topología de árbol, el cual va a dar una topología inicial de la red.

- **Asignación de antena y asignación de Potencias :** Consiste en la asignación apropiada de las antenas y sus respectivas orientaciones, se desarrolla un algoritmo heurístico de tiempo complejo polinómico. En cuanto a la asignación de potencias, se utiliza LP, para proporcionar la potencia óptima de transmisión.

- **Asignación de altura:** Consiste en la altura óptima de las torres en las ubicaciones dadas una vez que se ha formado la topología, para ello se utiliza un conjunto de ecuaciones de programación lineal LP, el cual se va a obtener la altura que sea óptima.

Como aporte *Sen* entrega un algoritmo de planeación de redes en zonas rurales y, una vez implementado, el autor en los resultados concluye que se ahorró 22 % con respecto a una planeación sin ninguna técnica de optimización.

## Redes BWA en Escocia

El autor *Bernardi* en [7](#) diseñó e implementó Tegola un banco de pruebas que proporciona internet a algunas comunidades remotas de Gran Bretaña, esta red ha funcionado desde el año 2008 y ha comunicado a 20 comunidades en toda Escocia. Esta red está situada en el noroeste de Escocia comunicando comunidades rurales (principalmente costeras) en las penínsulas de Glenelg y Knoydart en la isla británica hasta la península de Sleat en la isla de Sky.

Gran Bretaña es un país desarrollado, sin embargo, el proyecto se enfoca en comunicar zonas rurales o apartadas que no cuentan con acceso a internet de banda ancha (16,9 % del total de la población).

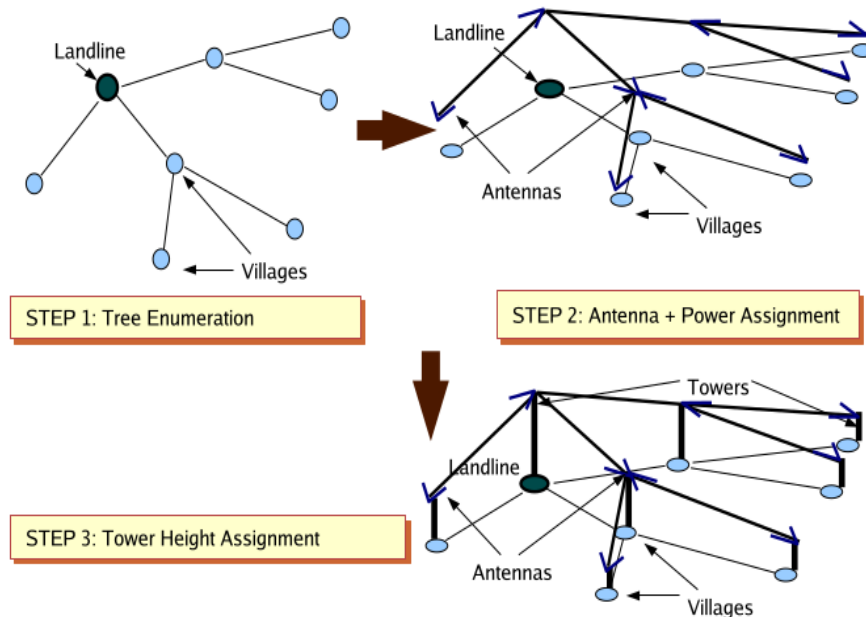


Figura 2.6: Secuencia de pasos solución del problema de planeación en la india. Fuente [19]

El autor afirma que la falta de herramientas de software para el diseño, gestión y evaluación de redes de acceso inalámbrico de banda ancha han obstaculizado su implementación generalizada a pesar de sus costos y ventajas operativas sobre otras tecnologías de Acceso de banda ancha.

Según *Bernardi*, en las últimas décadas se ha incrementado la conectividad de banda ancha utilizando la tecnología ADSL. Esta tecnología se caracteriza por que la tasa de transmisión máxima que puede alcanzar está en función de la distancia entre el usuario y la central telefónica, es decir, entre más larga sea la distancia, la velocidad de transmisión es más lenta, por esta razón es comúnmente más utilizada en áreas metropolitanas debido a que tiene más suscriptores y es más efectivo retornar la inversión de despliegue de una infraestructura. Esto es la principal causa de la brecha digital que existe entre las áreas rurales y metropolitanas.

También el autor argumenta que la solución es dar cobertura con conectividad inalámbrica, utilizando el protocolo IEEE 802.11 de larga distancia, sin embargo, esta requiere de una planeación que permita establecer que topología de red tiene mejor

retorno de inversión, así mismo, la industria ofrece software para la planeación de redes inalámbricas, pero estos no están disponibles, ni son adecuados para comunicar pequeñas comunidades y proveedores de servicio de Internet inalámbrico (WISP). Para solucionar esto se desarrolla un paquete de software con especial énfasis en las regiones rurales y en desarrollo, en la que aborda tres desafíos técnicos en el contexto de redes de acceso inalámbrico de banda ancha:

- Mapeo de Banda Ancha
- Planeación de redes
- Administración de redes

La parte que aporta al enfoque que se está trabajando en este proyecto es la planeación de redes, donde *Bernardi* desarrolla un software de código abierto llamado *IncrEase*, esto es una aplicación de escritorio multiplataforma desarrollado en Java. Este software está diseñado para potenciar el negocio de los pequeños proveedores de Internet inalámbrico (WISP) en zonas rurales, puesto que esta herramienta permite guiar las decisiones de cómo mejorar la cobertura o expandir la red, a través de sus dos modos de operación Targeted Increase y Strategy Search.

En la figura [2.7](#), se ilustra la forma de operación del software *IncrEase*, en donde se observa que se toman como parámetros de entrada, la información de::

- Demanda de la cobertura: Los usuarios que quieren conectarse a la red.
- Instalaciones fallidas: usuarios que intentaron conectarse a la red, pero fallaron.
- Ubicación y desempeño de los usuarios actuales: localización geográfica de los usuarios conectados actualmente, con las métricas de desempeño que tenga el administrador de la red.
- Solicitudes de soporte: mesas de ayuda y solicitudes de usuarios.
- Torres disponibles: torres que están conectadas actualmente.
- Topología de la red actual: la topología con que está conectada actualmente la red.
- Área de selección: área geográfica donde el WISP quiere invertir en infraestructura.

### **Modo de operación herramienta *IncrEase***

Esta información es expresada en forma de mapa de calor, en donde se mezclan para obtener una ponderación de calor, para esto, *IncrEase* está basado en un GIS de software libre de la NASA World Wind Java y en una base de datos de grafos Neo4J. Posteriormente, toda esta información serán ingresados a sus dos modos de operación.

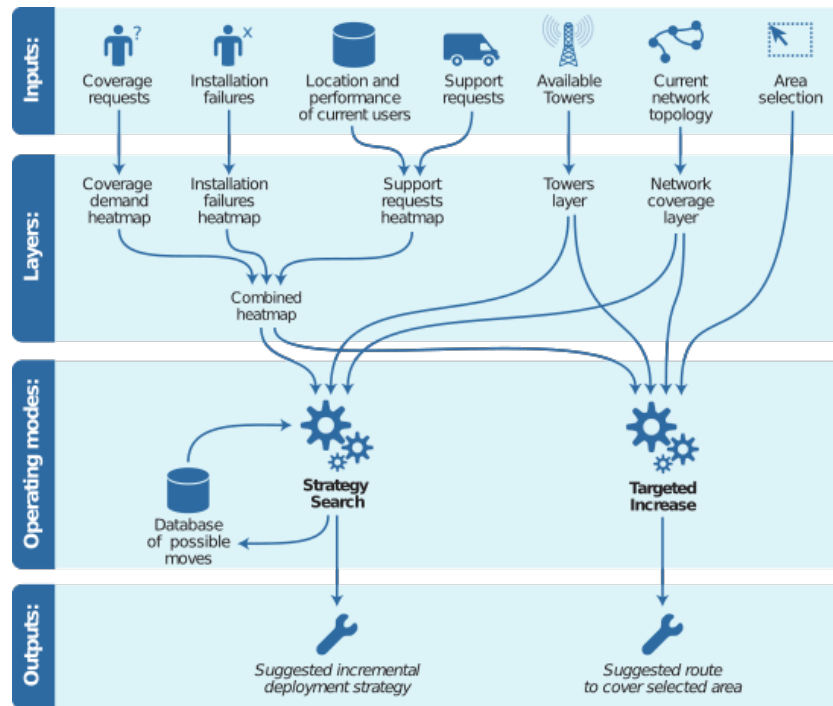


Figura 2.7: Ejemplo de flujo de información en la herramienta IncrEase. Fuente [7]

- IncrEase Targeted: en este modo de operación el operador selecciona una región específica de cobertura, como parte de expansión de la red y devuelve la ruta con mejor relación costo-beneficio.
- Búsqueda Estratégica: la herramienta guía al operador para decidir el orden de despliegue de sitios de transmisión en el horizonte de corto o largo plazo basado en la rentabilidad esperada

### Redes BWA en la región del Sumapaz (Colombia)

A nivel local, [23] propone una solución de construcción de topología en redes rurales dentro de la Realización del estudio de factibilidad, socialización Y capacitación, para implementación de infraestructuras de voz Ip Y comunicaciones convergentes en la región del Sumapaz ”, del grupo de investigación GIGATT de la universidad de Cundinamarca.

La región del Sumapaz es una de las quince provincias del Departamento de Cundinamarca (Colombia), en ella se encuentra el páramo del Sumapaz, el páramo más grande del mundo. Consta de 10 municipios con un 41 % de población rural del total de la población referente al año 2011, el énfasis del proyecto se plantea en la interconexión

de estas zonas apartadas.

Las adversas condiciones económicas y de acceso a las tecnologías de la información, hacen que este proyecto busque evaluar la viabilidad y conseguir alternativas asequibles de diseño e implementación de redes, en este aspecto este trabajo pretende reducir los principales costos involucrados en la implementación física de redes de comunicaciones rurales

Las razones que limitan la construcción de infraestructura en áreas rurales son:

- Costos de las torres
- Baja densidad de la población
- Bajo poder económico
- Costos de infraestructura y equipos

En el informe técnico del proyecto [31] se plantea la posibilidad de brindar acceso eficiente por medio de voz y video llamadas a las zonas rurales de la región del Sumapaz, ofreciendo cobertura a todas las localidades incluyendo las más vulnerables con una calidad en el servicio coherente con el tipo de aplicación y con tarifas acordes a la población, y paralelamente llevando a ellos servicios de comunicaciones convergentes, haciendo de este un proyecto autosostenible que coadyuve a la reducción de la brecha digital y permita el aprovechamiento de los beneficios del programa de Mintic Vive Digital [31]

Hay que mencionar además que *Ríos* participó de forma activa en este proyecto en el que la construcción de redes de comunicación rural presenta particulares desafíos sobre todo en el costo que conlleva establecerlas. Además refiere que un parámetro importante en el costo de redes rurales es la construcción de torres que soporten las antenas a la altura que permite establecer un buen enlace, debido a que este costo domina otros costos de infraestructura como el atribuido a los equipos de comunicación de el estandar IEEE 802.11 (WiFi), entonces el problema principal se convierte en mantener costos mínimos en la construcción de las torres de soporte para las antenas en cada nodo.

*Ríos* establece algunos factores principales en la planeación de la construcción de la topología y son:

- Requerimientos de conectividad: Primero, es importante asegurar que la topología planteada permita la conexión de la totalidad de la red
- Limitaciones físicas: Existen dos limitaciones físicas para la altura de las torres. Por ejemplo, existe una altura demasiada alta que representa un umbral para el



cual los costos son prohibitivos y una altura mínima que limita el uso de torres tubulares

- Naturaleza de la función de costos: Para alturas menores a 20m se suelen usar los mástiles económicos. Para alturas mayores, es necesario utilizar torres de acero más elaboradas, y por ende más caras, el costo de estas estructuras varía de manera casi lineal con la altura.
- Condiciones sobre las alturas de las torres para establecer un enlace directo: Para ello se debe garantizar que la potencia de transmisión sea suficiente para superar las pérdidas por espacio libre en toda la distancia del enlace. También, se busca mantener la línea de vista despejada de toda obstrucción.

Dentro de este contexto y al igual que *Sen, Bernardi, Maserati*, expone que el principal desafío es el costo que conlleva establecer redes en zonas rurales, haciendo especial énfasis en el costo de construcción de las torres que soportan las antenas, debido a que es el costo más grande en comparación con los atribuidos a los equipos de comunicación. Presenta los siguientes referentes:

**Topología** Establece que las redes rurales mantienen una topología fija y se realizan enlaces de larga distancia, sin embargo, al ser áreas campestres existe una mayor cantidad de obstrucciones y acorde la topografía varía la altura de los obstáculos.

**Costo de las torres** Para lograr obtener línea de vista entre los diferentes nodos es necesario que las torres tengan una altura suficiente para superar los obstáculos presentados en el terreno. Para la construcción de estas torres establece dos tipos de materiales:

- Mástiles
- Torres de acero ventadas

El costo de las torres, es proporcional a su altura y está relacionado con material de construcción, por ejemplo para un enlace de entre 7-8 Km (distancias típicas) se necesitarían torres de entre 30 m y 45 m con costos de entre 25 y 38 millones de pesos colombianos. Este costo es de varios órdenes de magnitud mayor que el de los equipos de comunicaciones, de manera que el principal problema de construcción de redes rurales radica en lograr una topología con el menor costo total de las torres que soportan las antenas.

*Rios* implementa el algoritmo propuesto en [3], se diseñó un algoritmo para asignar la altura de las torres donde cita a [19], puesto que sigue el mismo enfoque de reducir el costo de infraestructura de red en zonas rurales, por esta razón, el autor *Panigrahi*

proponen los algoritmos TC-ALGO Y START-TC-ALGO, el primero determina el valor de altura óptimo que permite obtener el mejor enlace dentro de un grupo de enlaces vecinos a un nodo principal y el segundo permite recorrer el grafo y ubicar el menor enlace o conjunto de enlaces que representan el menor costo de infraestructura. Estos algoritmos mejoran la heurística que propone *Sen*.

A continuación, se describe las ventajas que tienen los algoritmos de *Panigrahi* sobre la heurística propuesta por *Sen*:

- En la heurística no es posible conocer el límite de posibilidades, mientras en los algoritmos se tiene un límite de respuesta en el peor de los casos.
- En la heurística se propone solo un obstáculo en la mitad del enlace entre dos nodos, sin embargo, los algoritmos pueden encargarse de encontrar la respuesta óptima de la altura de las torres teniendo en cuenta todos los obstáculos entre el enlace de dos nodos.
- En la heurística se trabaja una función de costo lineal por cada torre, mientras que los algoritmos usan una función de costos más general.

# Capítulo 3

## Diseño metodológico

### 3.1. Analizar la información recopilada de redes inalámbricas enfocada a zonas rurales

Una vez se ha captado la información de planeación de redes se procede a realizar su respectivo análisis, tabulando todos los documentos encontrados, haciendo un rastreo y clasificación de los documentos, detallando:

Ficha bibliográfica )
- Tipo de documento - Título -Año -URL -Temática central -Estado del arte y marco conceptual reseñado -Metodología -Resultados

Tabla 3.1: Ficha bibliográfica para seleccionar los archivos de estudio.

De este análisis se delimitan los temas a contextualizar, obteniendo los siguientes:

- Brecha Digital
- Redes Libres Comunitarias
- Planeación de Redes Inalámbricas
- Algoritmos utilizados en la planeación

- Representación de la topología
- Herramientas de manipulación de grafos
- Planeación de redes móviles UMTS
- Redes BWA en zonas rurales

Con ello se pudo establecer que los primeros seis puntos harían parte del marco teórico y los dos siguientes pertenecerían al estado del arte, esto como resultado de que el enfoque de esta investigación está relacionado con la planeación de redes móviles y BWA en zonas rurales.

### **Determinar la información que cumpla con los requerimientos necesarios para diseñar el algoritmo**

Acorde al análisis ejecutado en la actividad anterior se encontró que los autores *Bernardi, Sen y Ríos* proporcionan la información necesaria para diseñar el algoritmo. Dentro de los requerimientos proporcionados se tienen:

- Topología de la red actual
- Número de torres disponibles
- Cobertura de la red, hace alusión al alcance geográfico
- Altura de las torres
- Zona de fresnel
- Costo de despliegue de la red
- Costo de la infraestructura y de los equipos
- Algunos datos demográficos y económicos de la población

### **Documentar el estado del arte**

Con toda la información analizada y los parámetros claros se documenta el estado del arte realizando una comparación entre los tres autores destacados mencionados con anterioridad. De ellos se establece

- *Sen* plantea su algoritmo en planear la red inalámbrica en zonas rurales de la India, se sabe que su contexto es social y rural

- *Bernardi* desarrolló su software basado en Tegola, una red existente en Escocia, ampliando su cobertura a zonas rurales considerando el nivel lucrativo de la red enfocado en pequeños proveedores de internet
- *Ríos* por su parte, aplica el algoritmo de [3] en la región del Sumapaz- Cundinamarca (Colombia) enfocando su idea en la interconexión de escuelas rurales añadiendo el costo de la construcción de la topología de la red.

En contexto, el estado del arte se puede estudiar en el capítulo 2 de este Libro.

### 3.1.1. Diseñar un algoritmo que permita identificar la mejor estrategia de expansión de la red inalámbrica en zonas rurales

Partiendo del análisis e información recolectada se determinan los parámetros necesarios para continuar con la etapa de diseño del algoritmo para planear el crecimiento de una red inalámbrica en zonas rurales. Para el desarrollo del algoritmo que permite la creación de una herramienta de planeación incremental de redes inalámbricas rurales, se plantea el modelo cascada que en el desarrollo de software es un proceso en el que todas las fases se realizan de forma secuencial, siguiendo un flujo de ejecución de arriba hacia abajo como una cascada. Esto permite hacer un fácil seguimiento del desarrollo del proyecto, realizando una distribución de tareas y delimitando sus fases.

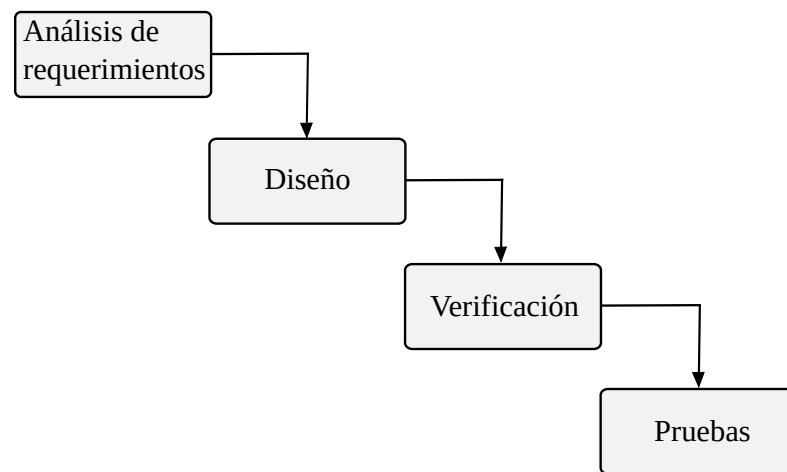


Figura 3.1: Estructura metodológica cascada. Fuente (Autores)

#### Análisis de requerimientos

Resolver la brecha digital que existe entre las áreas urbanas y las áreas rurales requiere aumentar la conectividad a Internet, para asegurar la conexión en áreas rurales es necesario realizar una planeación de redes inalámbricas que permita diseñar una infraestructura con un mínimo costo al momento de desplegar la red.

Los autores [19], [3] y [23], proponen que la altura de la torre constituye uno de los costos más importantes dentro de la construcción de una infraestructura de red

inalámbrica en áreas rurales, por esta razón se va a trabajar la asignación de la altura mínima en las torres de instalación.

En [23] se propone el diseño de una topología de infraestructura de red inalámbrica en la Región del Sumapaz implementando los algoritmos planteados en [3], en este trabajo se implementan estos algoritmos para proponer una topología que conecten unos puntos propuestos, en donde puede ir conectada una torre de antena con la mínima altura de nodos, creando una topología de mínimo costo.

Una vez desplegada la red con el mínimo costo es necesario guiar a los ISP en la expansión de la red, de tal manera que puedan retornar la inversión del costo de despliegue, en [7], propone una herramienta que facilita la planeación incremental de la red en zonas rurales, utilizando dos modos de operación, targeted IncrEase y búsqueda estratégica, el primero permite identificar las zonas que deben ser cubiertas por la red con una prioridad más alta y el segundo permite saber en qué lugares es más factible la inversión. Por lo anterior, y acorde al contexto local de este proyecto, existen proveedores de internet que operan en la región y necesitan una herramienta que les permita saber dónde invertir y aumentar la conexión en zonas rurales, por ello se toma los dos modos de operación propuestos por *Bernardi*.

Una vez estudiados los algoritmos que resuelven los requerimientos, se detallan los parámetros de entrada y salida de cada uno de los algoritmos propuestos por los autores.

### Definir los datos de entrada y salida del algoritmo

En esta sección se especifican las variables de entrada y salida de los algoritmos, entonces se tiene que:

- **Algoritmo planteado por Sen**

Datos de entrada
- Enumeración de árbol - Asignación de las antenas - Asignación de los valores de la potencia de las antenas - Asignación de las alturas de las torres en todos los nodos

Tabla 3.2: Datos de entrada del algoritmo planteado por *Sen*

- **Algoritmo diseñado por Bernardi**

Búsqueda estratégica: Cuya salida es la primer fila de la tabla [3.5]  
Targeted Increase: Cuya salida es la segunda fila de la tabla [3.5]

Datos de salida
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Topología de la red</li> <li>- Costo del árbol generado en comparación con otro anteriormente generado</li> </ul>

Tabla 3.3: Datos de salida del algoritmo planteado por *Sen*

Datos de entrada
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Demanda de la cobertura</li> <li>- Instalaciones fallidas</li> <li>- Ubicación y desempeño de los usuarios actuales</li> <li>- Solicitudes de soporte</li> <li>- Torres disponibles</li> <li>- Topología de la red actual - Área de selección</li> </ul>

Tabla 3.4: Datos de entrada del algoritmo planteado por *Bernardi*

Datos de salida
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Estrategia incremental de despliegue sugerido</li> <li>- Ruta sugerida para cubrir el área de selección</li> </ul>

Tabla 3.5: Datos de salida del algoritmo planteado por *Bernardi*

### ■ Algoritmo implementado por Rios

Esta aplicación esta basada en *Panigrahi*, dónde resulta la solución en dos algoritmos, el primero TC-ALGO( $G,c$ ) y el segundo START-TC-ALGO( $G,c$ ).

Datos de entrada TC-ALGO( $G,c$ )
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grafo <math>G(V,E)</math></li> <li>- Función de costos</li> </ul>

Tabla 3.6: Parametros de entrada del primer algoritmo de la aplicación, TC-ALGO( $G,c$ ) *Rios*

Ahora, con los datos de entrada y salida de los algoritmos estudiados, se determinan los parámetros de entrada y salida del algoritmo que se va a diseñar. Es decir, que el algoritmo que se va a proponer surge de la implementación secuencial de los algoritmos.



Datos de salida TC-Algo(G,c)
- Función de alturas h

Tabla 3.7: Parametros de salida del primer algoritmo de la aplicación, TC-Algo(G,c) *Rios*

Datos de entrada START-TC-Algo(G,c)
- Grafo G(V,E) - Función de alturas h - Nodo n - Incremento de la altura, variación en v

Tabla 3.8: Parametros de entrada del segundo algoritmo de la aplicación, START-TC-Algo(G,c) *Rios*

Datos de salida START-TC-Algo(G,c)
- Relación costo-beneficio r' best - Incremento de la altura incr

Tabla 3.9: Parametros de salida del segundo algoritmo de la aplicación, START-TC-Algo(G,c) *Rios*

mos vistos con anterioridad, seleccionando las variables que contribuyen a resolver el problema a nivel local.

- **Algoritmo propuesto (Datos de entrada y salida)**

Datos de entrada )
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grafo topología de la red</li> <li>- Asignación de antenas</li> <li>-Función de costos</li> <li>-TC-ALGO</li> <li>-START-TC-ALGO</li> <li>-Limitar el alcance geográfico</li> <li>-Red Backhaul disponible</li> <li>-Solicitudes de Cobertura</li> <li>-Clientes agrupados</li> </ul>

Tabla 3.10: Parametros de entrada del algoritmo propuesto

Datos de salida )
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grafo con la altura mínima de las torres considerando la relación costo-beneficio</li> <li>- Lista de nodos que se pueden conectar a un árbol con la altura mínima de las torres</li> </ul>

Tabla 3.11: Parametros de salida del algoritmo propuesto

### Determinar los requerimientos necesarios para ejecutar el algoritmo

El estándar IEEE 830-1998 para el SRS(en inglés) o ERS (Especificación de requerimientos de software) es un conjunto de recomendaciones para la especificación de los requerimiento o requisitos de software, basado en este estándar se determina:

- **Requerimientos funcionales**

Identificador de requerimiento	Entrada 1
Nombre del requerimiento	Cobertura
Características	Ubicación de la red existente
Descripción del requerimiento	Límite geográfico de la red actual
Prioridad del requerimiento	Alta

Tabla 3.12: Requerimiento funcional de cobertura

Identificador de requerimiento	Entrada 2
Nombre del requerimiento	Ubicación de los usuarios
Características	Identificación de la ubicación geográfica de los usuarios
Descripción del requerimiento	Detallar la localización geográfica de los usuarios para analizar la topografía del terreno
Prioridad del requerimiento	Alta

Tabla 3.13: Requerimiento funcional de la ubicación de los usuarios

Identificador de requerimiento	Entrada 3
Nombre del requerimiento	Torres disponibles
Características	Obtener acceso a la ubicación de las torres
Descripción del requerimiento	La ubicación espacial de las torres en el área de implementación de la topología de la red, permite saber que torres o conjuntos de ellas se pueden utilizar y así disminuir los costos de instalación
Prioridad del requerimiento	Alta

Tabla 3.14: Requerimiento funcional de las torres disponibles

Identificador de requerimiento	Entrada 4
Nombre del requerimiento	Topología de la red
Características	Obtener topología de la red existente y su ampliación
Descripción del requerimiento	Diseñar a partir de la topología de la red existente una nueva topología con el propósito de aumentar su cobertura y permitir que más usuarios accedan a ella
Prioridad del requerimiento	Alta

Tabla 3.15: Requerimiento funcional de la topología de la red

Identificador de requerimiento	Entrada 5
Nombre del requerimiento	Área de selección
Características	Determinar la zona rural en dónde se realizará la expansión de la red
Descripción del requerimiento	Al seleccionar la ubicación geográfica dónde se aplicará el algoritmo se analizarán las condiciones del terreno para la ubicación de las torres
Prioridad del requerimiento	Alta

Tabla 3.16: Requerimiento funcional del área de selección

Identificador de requerimiento	Entrada 6
Nombre del requerimiento	Ingreso de los datos
Características	Datos de entrada al algoritmo
Descripción del requerimiento	Permite que los diseñadores del algoritmo ingresen las diferentes variables o datos para el funcionamiento del programa.
Prioridad del requerimiento	Alta

Tabla 3.17: Requerimiento funcional del área de selección

- **Requerimientos NO funcionales**

Identificador de requerimiento	Int1
Nombre del requerimiento	Desempeño del algoritmo
Características	Eficiencia del algoritmo
Descripción del requerimiento	Evaluar el desempeño en velocidad de respuesta del algoritmo a los datos de entrada ingresados por el diseñador.
Prioridad del requerimiento	Alta

Tabla 3.18: Requerimiento no funcional, desempeño del algoritmo

Identificador de requerimiento	Int2
Nombre del requerimiento	Procesamiento del computador
Características	Eficiencia del equipo para ejecutar el algoritmo
Descripción del requerimiento	Determinar el hardware necesario para que se pueda ejecutar el algoritmo propuesto.
Prioridad del requerimiento	Alta

Tabla 3.19: Requerimiento no funcional, procesamiento del computador

Identificador de requerimiento	Int3
Nombre del requerimiento	lenguaje de programación
Características	Python
Descripción del requerimiento	El algoritmo se desarrollará en el lenguaje de programación Python.
Prioridad del requerimiento	Alta

Tabla 3.20: Requerimiento no funcional, lenguaje de programación

## Diseño

### Proponer el conjunto de operaciones secuenciales para la realización del Algoritmo

A partir de los tres algoritmos estudiados se plantea una nueva propuesta para el planeamiento de redes inalámbricas en zonas rurales. Para esto, se toman algunas características que contribuyen a dar solución al problema local (expandir la red Libre de Boschoque a la región del Sumapaz), esto con el fin de generar un nuevo algoritmo que permita dar conectividad a internet en zonas apartadas a un bajo costo. En la figura 3.2 se establece el diagrama sistémico del modo de operación de la herramienta propuesta.

1. Parámetros de entrada
2. Planeación incremental
3. Planeación del costo mínimo
4. Salida: Obtener una respuesta de planeación de redes inalámbricas rurales económica

### Descripción del proceso de operación del algoritmo propuesto

#### 1. Parámetros de entrada

- Grafo, conexión de toda la red: se ingresa un grafo con una topología propuesta dónde todos los nodos se encuentren conectados entre sí.
- Limitar el alcance geográfico: Se delimita la región en dónde se desea expandir la red existente.
- Solicitudes de cobertura: sectores o usuarios que desean adquirir el servicio de conectividad a Internet.

#### 2. Planeación incremental de la red

Una vez definidos los valores de parámetros de entrada, esta información es visualizada en forma de mapas de calor.

### Mapas de calor

Los mapas de calor son una herramienta visual que permite al usuario identificar zonas en dónde se necesita con mayor prioridad brindar conectividad a Internet. Entonces, a mayor concentración de color más alta es la prioridad.

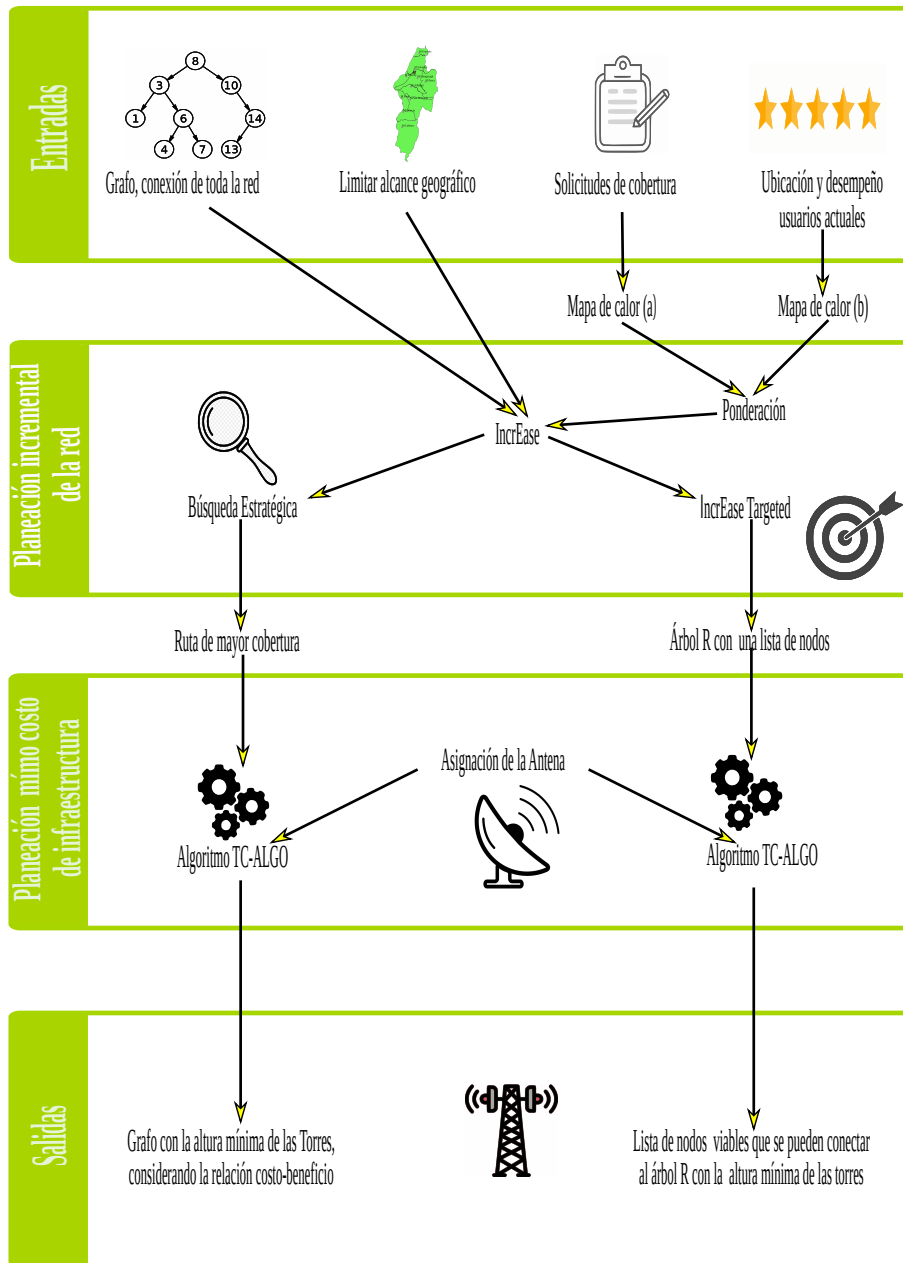


Figura 3.2: Diagrama sistémico modo de operación del algoritmo propuesto. Fuente (Autores)

Para realizar estos mapas se utiliza la herramienta QGIS, que es un Sistema de Información Geográfica de código abierto. QGIS se desarrolla usando el kit de herramientas

Qt y C++, esto significa que es ligero y tiene una interfaz gráfica de usuario (GUI) agradable y fácil de usar donde se puede visualizar, administrar, editar, analizar datos y componer mapas imprimibles. Además, incluye una poderosa funcionalidad analítica a través de la integración con GRASS, SAGA, Orfeo Toolbox, GDAL/OGR y muchos otros proveedores de algoritmos [32].

Ahora bien, en la herramientas QGIS se generan por medio de archivos .csv, .tif, .gdb, .qgs, .shp los mapas de calor necesarios para proporcionar los datos de entrada que alimentarán el algoritmo, entonces, se consideran dos fuentes de información y de cada fuente se genera un mapa de calor diferente.

- Mapa de calor de las solicitudes de cobertura: sugiere los lugares en los que se encuentra mayor cantidad de usuarios que solicitan el servicio.
- Mapa de calor de la ubicación y desempeño de los usuarios actuales: Permite saber la ubicación de los usuarios que hacen parte de la red actual y el nivel de funcionamiento de estos nodos.

Una vez se han obtenido los mapas de calor se hace la unión de los tres a fin de determinar que lugares se deben cubrir con mayor prioridad, teniendo en cuenta la relación costo-beneficio, es decir, que permita el acceso a internet a la mayor cantidad de personas pero a un bajo costo.

### **Algoritmo IncrEase**

En esta parte, se ha diseñado dos algoritmos a partir de los dos modos de operación de software Increase explicado en [7]. Para explicar el funcionamiento del algoritmo es importante tener en cuenta las siguientes notificaciones:

- $T$ : Es el conjunto de todas las torres (instaladas y viables)
- $N$ : Es el subconjunto de  $T$  de sólo torres que están actualmente utilizadas en la topología de red
- $H(t)$ : Es la cantidad total de calor para la torre  $t \in T$ .  
definidas como
- la suma de los valores cubiertos de la celda de calor por la torre.
- $C(t)$ : es el costo de instalación de la torre  $T$

A continuación, se explicará a detalle cada uno de los modos de operación:



### ■ IncrEase targeted

El algoritmo encuentra la mejor manera de conectar cada una de las torres viables  $T - N$  a las torres de la topología de red existente  $N$  atravesando enlaces en el grafo  $G$ . La “mejor” solución es la ruta que proporciona el valor más bajo para la diferencia  $c(t) - h(t)$  para cada torre  $t$  atravesada. En este cálculo, se evita cuidadosamente contabilizar varias veces el “calor” asociado con una torre que puede estar en línea de vista con diferentes torres, ya que sesgaría los resultados. Así que, se considera el valor de estas torres solo una vez. Este modo de operación usa el algoritmo  $A^*$  (A-star).

$A^*$  utiliza la mejor búsqueda en primer lugar, basada en una función heurística de distancia más costo, encuentra la ruta de menor costo desde un nodo inicial a un nodo objetivo. La implementación tiene dos pequeños cambios con el algoritmo original  $A^*$ . Primero, toma como entrada un conjunto de nodos de inicio (torres más cercanas a la celda más caliente en la región seleccionada) y un conjunto de nodos de objetivo en lugar de un solo inicio / final de nodos, ya que la ruta de retorno puede comenzar desde cualquiera de las ubicaciones candidatas y terminar en cualquiera de las torres existentes. Segundo, en el grafo  $G$ , los costos son asociados con los vértices (es decir, torres) en lugar de bordes, por lo que se considera el costo de un borde  $(i, j)$  para que sea el nodo de salida  $i$  [33].

$A^*$  requiere una función heurística que sea el límite mínimo inferior del posible costo de la ruta (Por ejemplo, para viajar entre dos ciudades, es la distancia por línea recta), así que en este caso se necesita diseñar una estimación de la mejor  $C(t) - h(t)$  que se pueda lograr para el resto del camino desde una torre dada hasta la torre central. Se adoptó

$$\frac{l}{d} * Cmin$$

donde:

- $l$  es la distancia en línea recta entre la torre actual que se está analizando y cualquiera de las torres centrales (en km).
- $d$  es la máxima distancia permitida para enlazar punto a punto (en km).
- $Cmin$  el mínimo  $C(t) - h(t)$  de cada torre.

Finalmente, se introducen dos modificaciones a la función de costos presentada antes. Como  $A^*$  requiere costos de bordes no-negativos, se suma un valor positivo grande constante arbitrario a todos los  $C(t) - h(t)$  valores. Por último, para permitir al usuario equilibrar la importancia de ahorrar dinero y ampliar la cobertura se permite dos coeficientes variables  $Co$  y  $ho$  y se define el costo como  $Co * C(t) - ho * h(t)$ .

Ahora, se muestra el pseudocódigo que describe el algoritmo del modo de operación anteriormente explicado:

```

parámetros:  $G$ ,  $\text{nodos\_origen}$ ,  $\text{nodos\_objetivo}$ 
mínima_ruta  $\leftarrow \infty$ ;
for  $i \in \text{nodos\_fuente}$  do
  for  $j \in \text{nodos\_objetivo}$  do
    ruta  $\leftarrow A^*(G, i, j, \text{heuristica}, \text{nodos\_objetivo})$ ;
    cont  $\leftarrow 0$ ;
    for  $k \leftarrow \text{nodo} \in \text{ruta}$  do
      | contador = contador +  $k(\text{costo} - \text{calor})$ ;
    end
    if cont < mínima_ruta then
      | mínima_ruta  $\leftarrow$  cont;
      | A  $\leftarrow$  ruta;
    end
  end
end
retorna : A

```

El resultado es una lista  $A$  con la ruta que tiene el valor mínimo de la suma de los valores costo-calor.

### ▪ Búsqueda estratégica

Mientras que `IncrEase targeted` es un modo semi automático que requiere que el operador seleccione una región, el modo operacional de *búsqueda estratégica* identifica y sugiere la mejor estrategia de expansión de la red. Se asume que la topología de la red evoluciona sobre intervalos discretos de tiempo arbitrarios (meses, semanas) y el capital de inversión sobre un intervalo discreto de tiempo del WISP está limitado por un parámetro discreto que determina cuántos movimientos (instalaciones de torres) se pueden realizar en cada intervalo de tiempo. El objetivo de búsqueda estratégica es sugerir la mejor acción que el WISP pudiera tomar durante el siguiente intervalo de tiempo. Una limitación práctica es el denominado *efecto horizonte*: como en muchos juegos de inteligencia artificial, el número de posibles estados es tan grande que sólo es posible buscar en una pequeña porción de todo el potencial de movimientos en el horizonte de tiempo. El algoritmo de búsqueda necesita ser capaz de reducir el número de posibles estrategias para analizar, mientras limita el riesgo de excluir unas buenas regiones.

A continuación, se describe el modo de operación:

**Paso 1:** Se ejecuta en el grafo de intervisibilidad  $G$  para identificar los caminos de menor costo, con costos iniciando en  $C(t) - h(t)$  como antes, a partir de cada uno de los nodos en el conjunto  $T - N$  (torres disponibles) a cualquiera de los nodos en  $N$ . La salida es un árbol  $R$ , que intuitivamente suministra el mejor camino de la red existente a cada torre disponible. Para generar  $R$ , se añade una torre “raíz” ficticia de cero costo conectada a cada torre en  $N$  y ejecuta un algoritmo de Dijkstra de la raíz cada nodo en el grafo  $G$ . Un ejemplo se suministra en la figura 3.3 donde se muestra el grafo de inter visibilidad  $G$  con nodos sombreados siendo aquellos que ya están instalados

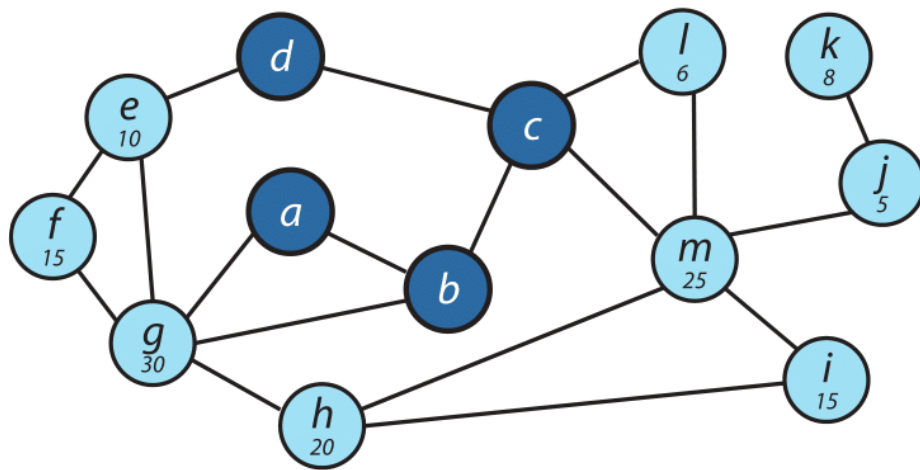


Figura 3.3: Grafo  $G$ . Fuente [7]

**Paso 2:** El grafo  $R$  se atraviesa iniciando desde la raíz y en el transcurso la torres se etiquetan con el marcador:

$$\frac{h(r) - c(r)}{(1 + C)^{distancia(r)}}$$

dónde  $distancia(r)$  es la cuenta de las torres nuevas que se tiene que atravesar para alcanzar  $r$  a partir de la “raíz” de  $R$  (torres que se pueden conectar directamente a la red tienen distancia cero). Como no todas las torres se pueden conectar inmediatamente a la red para ganar los beneficios de la cobertura asociada a cada una de ellas, otras pueden tener que ser instaladas primero para servir como *back-hauling relays*. Para medir los beneficios de cubrimientos futuros para hoy se toma el concepto financiero de valor presente neto (NPV) que aplica una tasa de descuento constante  $C$  (por ejemplo 5%, 0.05) a las ganancias que ocurrirán en el futuro. Un ejemplo se muestra en la figura 3.4 (a). Acá las dos torres  $a$  y  $b$  se podrían instalar y conectar directamente al mástil existente  $n$ . Los nodos  $b$  y  $f$  cada uno produce un beneficio  $h(t) - c(t)$  de 100, mientras

que las otras torres suministran un beneficio mucho menor. El parámetro  $C$  es una medida de la voracidad de la selección: si se escoge  $a$  y  $b$  basados en el beneficio total que ellos y sus descendientes podrían producir, se podría decidir instalar la torre  $a$  como se muestra en la figura 3.4 (b). Sin embargo, si se incrementa el valor de  $C$  al 5%  $b$  se vuelve más atractivo como se ve en la figura 3.4 (c). El NPV controla cuán lejos es posible ir para instalar torres que dejen ganancia, permitiéndole al propietario de la red afinar la duración del retardo del beneficio.

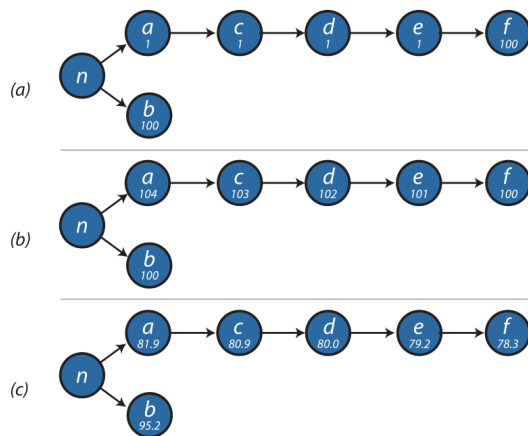


Figura 3.4: Valor presente Neto. Fuente [7]

**Paso 3:**  $R$  se atraviesa una vez más, esta vez desde las hojas hasta la raíz. Mientras se hace esto, se actualiza el puntaje de cada nodo  $r$  a la suma de su propio puntaje y sus descendientes. Se muestran los puntajes obtenidos después del paso tres en la figura 3.8.

Finalmente, IncrEase pregunta el número de movimientos (torres a ser instaladas). Entonces genera una lista ordenada  $L$  figura que incluye la torres que se deberían instalar inmediatamente ordenadas según su puntaje de beneficio, posteriormente extrae el nodo superior de  $L$  y finalmente lo presenta en el mapa de los resultados.

A continuación, se muestra el pseudocódigo que describe el algoritmo del modo de operación anteriormente explicado:

De estos modos de operación se obtiene una ruta de mayor cobertura (Búsqueda estratégica) y un árbol con una lista de nodos viables para conectarse (IncrEase targeted). Estas respuestas ingresan individualmente a la etapa de planeación de mínimo costo de infraestructura, es decir ingresan al algoritmo TC-Algo y allí se le asignará la antena.

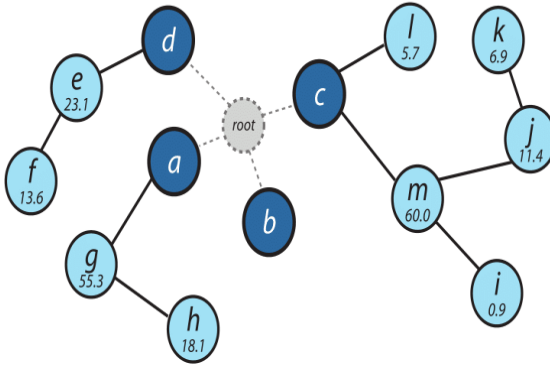


Figura 3.5: Grafo R. Fuente [7]



Figura 3.6: Lista L. Fuente [7]

### 3. Planeación mínimo costo de infraestructura

Para la planeación de mínimo costo de infraestructura, se enfocara en asignar dos parámetros que influyen en los costos de infraestructura, estos son: altura de las torres, el cual es el parámetro mas importante y las antenas.

#### Asignación de altura de las torres

Para esta parte del algoritmo, se ha tomado el algoritmo TC-ALGO propuesto por [3], en [23], se encuentra su implementación y descripción a detalle, A continuación se explica este algoritmo:

**parámetros:**  $G$ ,  $nodos\_instaladas$ ,  $nodos\_viables$ ,  $c$

```

R ← G;
agregar nodo raíz → R;
for  $i \leftarrow nodo \in G$  do
    |  $ruta \leftarrow Dijkstra(G, raíz, i, peso(calor - costo), torres\_viables)$ ;
    |  $ruta \rightarrow R$ ;
end
NPV →  $n \in R$ ;
for  $j \leftarrow node \in R$  do
    |  $j := NPV + NPVnodosdescendientes \in R$ ;
end
eliminar raíz ∈ R;
retorna : R

```

### Algoritmo TC-ALGO

Determina el valor de altura óptimo que permite obtener el mejor enlace dentro de un grupo de enlaces vecinos a un nodo principal; este algoritmo contiene a START-TC-ALGO (algoritmo que permite recorrer el grafo y ubicar el menor enlace o conjunto de enlaces que representan el menor costo beneficio), también, contiene la función de costos  $C(n)$ .

### Función de costos

La función de costos  $c$  relaciona la variación de costos con la altura tanto de mástiles tubulares y torres de acero ventadas. Según [23], los mástiles son estructuras simples que resultan económicas, pueden ser elaboradas con diferentes materiales y muchas veces montadas sobre estructuras o edificaciones existentes. Las torres ventadas son torres de acero mucho más elaboradas que los mástiles, son estructuras que pueden sostener una carga de fuerzas mayores, pero aun así, son con relación a otros tipos de torre, más económicas.

Entonces, la ecuación de costos es una función por partes la cual para alturas menores a  $hmin$  considera los valores correspondientes a los mástiles económicos, para alturas mayores se evalúan los costos de las torres ventadas. Por tal motivo la siguiente función resulta apropiada:

$$c(h) = \begin{cases} k & \text{si } 0 \leq h \leq hmin \\ Ah + B & \text{si } hmin \leq h \leq hmax \end{cases}$$

Donde  $K$ ,  $A$  y  $B$ , representan constantes y  $Ahmin + B \gg k$  [3].

## Descripción del algoritmo

En la descripción del algoritmo se involucra el problema de construcción de la topología (TC). Un grafo no dirigido  $G(V, E)$  determina la estructura de red, donde  $V$  es el conjunto de nodos,  $E$  el conjunto de aristas o enlaces y  $n = |v|$ . Un subgrafo denominado  $COVER(h)$  corresponde al conjunto de aristas que son establecidas por la función de altura  $h$ . Cada valor en  $h$  corresponde a un valor en la función de costos  $c$ , la cual está determinada por  $\sum c(h(u))$ . El éxito del algoritmo reside en encontrar una función de alturas  $h$  en la cual el costo total sea mínimo.

## Asignación del tipo de antena

En el trabajo [29], se resuelve el problema de evitar la interferencia al máximo, mientras se minimiza el conjunto de antenas a utilizar.

Para realizar los enlaces, es necesario saber qué tipo de antena se va a utilizar, aquí el parámetro que se va a tener en cuenta principalmente es la apertura de ancho de haz o el HPBW (*Half Power Beam Width*) que definirá la cantidad de nodos que pueda cubrir una antena, ya que si por ejemplo se va a realizar un enlace P-T-P, se puede realizar con una antena direccional de un ancho de haz de 8 puesto que el enlace cubrirá un solo punto, mientras que si se realiza un enlace M-T-P, se debe tener en cuenta una antena sectorial con un ancho de haz de 30 o 22 que pueda cubrir más puntos.

Ahora, teniendo en cuenta esto se describirá la Heurística propuesta por *Sen*.

- Heurística de planeación de antena

El autor *Sen* propone una heurística que vamos a implementar la cual está dada en un tiempo complejo de  $O(n^2)$ , donde  $n$  es el número de nodos hijos. Esta heurística se enfoca en disminuir el número de interferencia entre un conjunto de enlaces.

- Heurística

1 - Reorganizar el conjunto de nodos hijos de tal manera que el máximo ángulo de separación sean los nodos que están más alejados.

2 - Recursivamente en cada nodo se realiza lo siguiente:

Determinar el conjunto de antenas o antena que cubre la totalidad de los nodos hijos.

Dividir el ángulo de máxima separación, en subconjunto de ángulos que tiene la torre para que cubra todos los nodos y determinar el costo de cada uno de estos subconjuntos.

3 - Fin de la recursividad: cuando exista un conjunto de antenas que cubran todos los nodos con el menor costo.

## 4. Salida

Los datos de salida se obtienen una vez realizado la planeación incremental de la red y la planeación del mínimo costo de infraestructura. De acuerdo con la figura n, a partir de el resultado generado entre Búsqueda estratégica y Algoritmo TC-Algo se obtiene un grafo con la topología de la red y la altura mínima que deben tener las torres para que haya comunicación, además de considerar la relación costo beneficio, es decir, que se pueda llevar acceso a Internet a más población pero con un costo mínimo de despliegue. Por otro lado, el resultado entre IncrEase targeted y el Algoritmo TC-Algo es una lista de nodos viables que se pueden conectar al árbol R con la altura mínima que deben tener las torres a fin de que tengan conexión.

### Codificación del algoritmo

Para codificar el algoritmo IncrEase se utilizó el lenguaje de programación Python, puesto que es un lenguaje de alto nivel, multiparadigma y de código libre, que posee una gran cantidad de librerías y Framework que son actualizados frecuentemente por la comunidad. Esto permite una amplia variedad de herramientas, que permiten un desarrollo de software rápido y eficiente en diferentes áreas como la ingeniería; entre estas herramientas se encuentran librerías de procesamiento matemático Numpy y Scipy, además, para trabajar con estructura de datos, Python tiene la librería Networkx, el cual es un paquete que trabaja con diferentes tipos de estructuras de datos, entre las que se encuentran grafos y árboles, permitiendo trabajar el enfoque propuesto con facilidad y eficiencia.

En este proyecto, se consideran también algunas desventajas de Python, como su tiempo de ejecución lento si se compara con otros lenguajes de programación como Java, C o C++, sin embargo, sus librerías, herramientas y la simplicidad de su sintaxis, compensan de manera significativa el tiempo de ejecución en un desarrollo eficaz, de fácil entendimiento y con posibilidad de aportar una herramienta libre, que puede ser mejorada por la comunidad.

En este trabajo se desarrollaron las funciones: `-TargetedIncrease` `-searchIncrease`

los cuales representan cada uno de los modos de operación del software IncrEase propuesto en [7]. A continuación, se detalla la codificación de cada una de las funciones:

- TargetedIncrease

Para codificar `TargetedIncrease`, se utilizó y modificó la función `astar_path` de la librería Networkx, que retorna una lista  $L$  con el camino más corto de un nodo origen a un nodo objetivo utilizando el algoritmo  $A^*$ , sin embargo, en el algoritmo propuesto por *Bernardi*, se propone uno o más nodos fuente y objetivo, y retorna el valor mínimo de costo menos calor.



```

1 def targetIncrease(G,listSource,listTarget):
2     """Retorna una lista de nodos en un camino de uno
3     o más nodos origen a uno o más nodos objetivo,
4     con el valor mínimo de la suma de los valores costo-calor.
5
6     Parámetros
7     -----
8     G      :   NetworkX graph
9               Grafo con los atributos posición,
10              costo y calor de cada uno de los nodos.
11     listSource :lista
12              lista con los nodos origen.
13     listTarget :lista
14              lista con los nodos objetivo.
15     Retorna
16     A      :   lista
17              lista de nodos.
18     """
19     miniContPath= 9999
20     for i in listSource:
21         for j in listTarget:
22             answer=astar_path(G,i,j,heuristica,
23                               listNodeTarget= listTarget)
24             cont = 0
25             for k in answer:
26                 cont=cont+(G.node[k]['costo']-G.node[k]['calor'])
27             if cont < miniContPath:
28                 miniContPath = cont
29                 A= answer
30     return A

```

Esta función utiliza la función `astar_path` con el algoritmo modificado  $A^*$  como se muestra a continuación:

```

1 def astar_path(G, source, target, heuristic=None,
2               listNodeTarget= None):
3
4     """Retorna una lista de nodos en un camino de un nodo origen
5     a un nodo objetivo utilizando el algoritmo  $A^*$ . Puede haber más
6     de un camino corto, sin embargo, solo devuelve uno.
7
8
9     Parámetros
10    -----
11    G      :   NetworkX graph.
12    source :   node
13              Nodo inicial del camino.

```

```

14     target :     node
15                 Nodo final del camino.
16     heuristic : function
17                 Es una función que estima el valor de cada nodo
18                 recorrido con el valor de (costo - calor).
19                 Esta función toma de argumento un nodo y devuelve un
20                 valor numérico.
21
22     Retorna
23     -----
24     A      :     lista
25                 Lista de nodos.
26     Raises
27     -----
28     NetworkXNoPath
29         Si no existe un camino entre un origen y un objetivo.
30     """
31     if G.is_multigraph():
32         raise NetworkXError("astar_path() not implemented for
33         Multi(Di)Graphs")
34
35     push = heappush
36     pop = heappop
37     #Almacena la cola prioritaria, nodo, costo de atravesarlo y padre.
38     #Usa la libreria heapq para mantener el orden de la prioridad.
39     #Adiciona un contador en la cola para evitar un monto subyacente
40     #intente comparar los nodos.
41     #prioriza y garantiza un unico para todos los nodos del grafo.
42     c = count()
43     queue = [(0, next(c), source, 0, None)]
44
45     #Asigna los nodos en cola a la distancia de las rutas descubiertas
46     y las heurísticas calculadas al objetivo. Evitamos calcular la
47     heurística más de una vez e insertar el nodo en la cola
48     demasiadas veces.
49     enqueued = {}
50     # Asigna los nodos explorados al padre más cercano al origen.
51     explored = {}
52     minCosto=[]
53     while queue:
54         # Pop del elemento mas pequeño de la cola queue.
55         _, __, curnode, dist, parent = pop(queue)
56
57         if curnode == target:
58             path = [curnode]
59             node = parent
60             while node is not None:
61                 path.append(node)
62                 node = explored[node]

```

```

63         path.reverse()
64         return path
65     if curnode in explored:
66         continue
67     explored[curnode] = parent
68     maximaDist= maximaDistancia(G)
69     for neighbor, w in G[curnode].items():
70         if neighbor in explored:
71             continue
72         ncost = dist
73         if neighbor in enqueued:
74             qcost, h = enqueued[neighbor]
75             # sí qcost < ncost
76             #queda un camino más largo hacia el vecino en cola.
77             #Eliminarlo necesitaría filtrar toda la cola, es mejor
78             #dejarlo allí e ignorarlo cuando visitamos el nodo
79             #por segunda vez.
80             if qcost <= ncost:
81                 continue
82         else:
83             #heurística
84             #h = l / d * (Cmin)
85             h = (distNodeTarget(curnode, listNodeTarget)*
86                 heuristic(neighbor))/maximaDist
87             minCosto.append(h)
88             enqueued[neighbor] = ncost, h
89             push(queue, (ncost + h, next(c), neighbor,
90                 ncost, curnode))
91         raise nx.NetworkXNoPath("Node %s not reachable from %s" %
92             (source, target))
93     return minCosto

```

y toma como heurística  $(l/d) * Cmin$ , donde cada variable es calculada por una función:

$l$  es la función `distMinNodeTarget(G, curnode, listNodeTarget)` que tiene como parámetro de entrada el grafo  $G$ , el nodo actual *curnode* y una lista de nodos objetivos *listNodeTarget*. La salida es la distancia mínima del nodo que se está analizando y cualquiera de los nodos objetivo. En esta función se obtiene del parametro  $G$  el valor de la posición de los nodos *pos* que contiene las coordenadas de latitud y longitud, luego, mediante la función “distancia” que retorna la distancia en km de los enlaces para posteriormente comparar el valor de las distancias y retornar la que tiene el mínimo valor.

```

1 def distNodeTarget(nodo, listTarget):
2
3     """Retorna mínima distancia entre el nodo y cualquiera

```

```

4     de los nodos objetivo.
5
6     Parámetros
7     -----
8     nodo      :   node
9                 Nodo atravesado.
10    listTarget :   list
11                 Lista de nodos objetivo.
12
13    Retorna
14    -----
15    maxDistancia :   float
16                 Máxima distancia.
17
18    """
19    miniDist = 999
20    for i in listTarget:
21        dis = distancia(nodo, i )
22        if dis < miniDist:
23            miniDist = dis
24    return miniDist

```

$d$  es la función `maximaDistancia(G)` que tiene como parámetro  $G$  y retorna la distancia máxima en km de los enlaces.

```

1 def maximaDistancia(G):
2     """Retorna el valor de la maxima distancia de un enlace
3     del grafo G.
4
5     Parámetros
6     -----
7     G      :   NetworkX graph
8                 Grafo con el atributo pos.
9
10    Retorna
11    -----
12    maxDistancia :   float
13                 Máxima distancia.
14
15    """
16    pos = nx.get_node_attributes(G, 'pos')
17    lisI=[]
18    lisF=[]
19    lista=[]
20    maxDistancia = 0
21    for i in pos.keys():
22        for j in pos.keys():
23            lat1=pos[i][0]
24            lon1=pos[i][1]
25            lisI.append(lat1)
26            lisI.append(lon1)
27            lat2=pos[j][0]

```

```

27         lon2=pos[j][1]
28         lisF.append(lat2)
29         lisF.append(lon2)
30         lista.append(lisI)
31         lista.append(lisF)
32         #distancia calculada para coordenadas
33
34         distancia = m.cal_dis(lista)
35
36         if distancia > maxDistancia:
37             maxDistancia = distancia
38         lisI=[]
39         lisF=[]
40         lista=[]
41     return maxDistancia

```

*cmin* es la función heurística(*nodo*), aquí se ingresa un nodo donde se toman los valores *costos* y *calor*, después retorna la diferencia de estos.

```

1 def heuristica(G, nodo):
2
3     """Retorna un valor numerico con el valor del atributo
4     costo - calor de un nodo.
5
6     Parámetros
7     -----
8     G      :   Networkx Graph
9     nodo   :   node
10            nodos con atributo costo y calor.
11
12     Retorna
13     -----
14     valor numérico de costo - calor de nodo.
15
16     """
17     return(G.node[nodo]['costo'] - G.node[nodo]['calor'])

```

Por último, se comparan los caminos que se forman al ejecutar la función `astar_path` y retorna una lista *L* con el camino que tenga el valor mínimo de la sumatoria de costo menos calor de cada uno de los nodos.

- Search IncrEase

El algoritmo Search IncrEase es un algoritmo que utiliza el algoritmo Dijkstra, con alguna modificaciones propuestas por *Bernardi* en donde especifica que, en vez de medir el valor de vértices, se mide el valor de unos nodos etiquetados con un valor NPV, que corresponde a un concepto de financiación Net Present Value o en español “Valor Presente Neto”, que aplica una tasa de descuento y está representada con la constante *C* (por ejemplo 5% 0.05) a las ganancias que ocurrirán en el futuro.

La función `searchIncrease(G, N, T-N, c)`, toma como parámetro el grafo  $G$ , una lista  $N$  que contiene un conjunto de nodos, que representan las torres que están actualmente instaladas, una lista  $T - N$  con un conjunto de nodos, que representan las torres viables, y, por último, una constante que dependerá el valor de tasa de descuento  $C$ .

Esta función crea un árbol  $R$ , uniendo los caminos obtenidos ejecutando el algoritmo Dijkstra desde el un nodo ficticio “*root*” que está conectado a todas las torres instaladas  $N$ , a cada una de las torres  $T - N$ , utilizando como ponderación la distancia de los enlaces, más el valor de *costo-calor*, de cada nodo atravesado, y luego, se crea un diccionario, de cada nodo del árbol  $R$ , con la etiqueta NPV, dada por la ecuación:

$$\frac{h(r) - c(r)}{(1 + C)^{\text{distancia}(r)}}$$

Luego, al igual como se explicó en la sección anterior, el grafo es recorrido desde las hojas, hacia el nodo “*root*”, mientras tanto, se actualiza el valor  $NPV$ , con la suma de su propio valor y el valor de sus descendientes. Por último, una vez todos los nodos tengan actualizado, se devuelve un diccionario con llave nodo y con valor actualizado  $NPV$ , además, devuelve una lista con los valores de mayor a menor de  $NPV$ .

```

1 def searchIncrease(G, N, T_N, c):
2     """Retorna un árbol R formado a partir de un nodo "root"y
3     los caminos mas cortos del conjunto de torres instaladas N
4     a todas las torres viables T_N utilizando algoritmo dijkstra,
5     con la diferencia de que no se cuenta el valor
6     de la arista,
7     sino del nodo etiquetado con el valor NPV. Un diccionario con
8     los nodos con el atributo NPV, ademas de una lista con los nodos
9     ordenados de mayor a menor NPV.
10
11     Utiliza el algoritmo searIncrease diseñado por Bernardi 2012.
12
13     Parámetros
14     -----
15     G      :      NetworkX graph.
16
17     N      :      list
18                 Lista con nodos de torres instaladas.
19
20     T_N   :      list
21                 Lista con nodos de torres viables.
22
23     c      :      float
24                 coeficiente de ganancia o retorno de inversión.
25
26
27     Retorna

```

```

28  -----
29  R      :   NetworkX tree
30
31  dicNpv  :   Dictionary
32             Diccionario con llave nodo y valor NPV.
33
34  listNpv :   list
35             Lista ordenada de mayor a menor con valores NPV.
36             .
37  """
38  #agregar nodo raiz
39  G.add_node('root', cab = [0, 0])
40  lista=[]
41  for i in N:
42      tupla=('root', i)
43      lista.append(tupla)
44  G.add_edges_from(lista)
45  listPath=[]
46  #aplicar el algoritmo Dkjistra desde el nodo raiz a cada n de G
47  R=nx.Graph()
48  v= nx.get_node_attributes(G, 'pos')
49  for i in v.keys():
50      path = dijkstra_path(G, "root", i, weight='diferencia', N=N)
51      listPath.append(path)
52      for i in range(len(path)-1):
53          R.add_edge(path[i],path[i+1])
54  for i in N:
55      tupla=('root', i)
56      lista.append(tupla)
57  R.add_edges_from(lista)
58
59  #list generaciones
60  listGen=[]
61  ###etiquetar nodos
62  #atributos de distance r : distancia al nodo raiz
63  NPV= {}
64  lista = []
65  pasado = N
66  GenR=  nextGeneration(R,N)
67  listGen.append(GenR)
68  for i in GenR:
69      NPV[i]= G.node[i]['diferencia']/(1 + c)
70  bandera=0
71  cont = 1
72
73  while bandera==0:
74      cont += 1
75      nextGen = nextGeneration(R,GenR, pasado= pasado)
76      pasado = GenR

```

```

77     GenR=nextGen
78     listGen.append(GenR)
79     for j in nextGen:
80         NPV[j]= G.node[j]['diferencia'] /(1 + c)**cont
81     if nextGen == []:
82         bandera=1
83     nx.set_node_attributes(R,NPV,'NPV')
84
85     #ponderar puntos
86     u= T_N
87     for i in listGen[::-1]:
88         if i == []:
89             continue
90         for j in i:
91             path =nx.shortest_path(R, "root", j)
92             cont=0
93             for k in path[::-1]:
94                 if k in u :
95                     cont += R.node[k]['NPV']
96                     R.node[k]['NPV']= cont
97
98     #listar nodos con mas valor
99     listNpv= []
100    dicNpv =nx.get_node_attributes(R,"NPV")
101    for i in dicNpv.keys():
102        listNpv.append(R.node[i]['NPV'])
103    listNpv=sorted(listNpv)
104    listNpv=listNpv[::-1]
105
106    #borrar root en G
107    G.remove_node("root")
108
109    return R , dicNpv, listNpv

```

Ahora, la función search utiliza una función nextGeneration para listar los nodos del árbol  $R$ , donde utiliza una lista con los nodos instalados y una lista con los nodos pertenecientes a la pasada generación:

```

1 def nextGeneration(R, N , pasado= None ):
2     """Retorna una lista con los nodos de la
3     siguiente generación de hijos.
4
5     Parámetros
6     -----
7     R      :   NetworkX tree.
8
9     N      :   list
10             Lista de nodos que funcionaran como backhaul.
11

```



```

12 pasado : list
13         Lista con la generación de nodos pasado.
14
15
16 Retorna
17 -----
18 listNeih : list
19           Lista con los nodos de la siguiente generación
20           de hijos.
21
22 """
23 #listar nodos primera generacion
24 listNeih=[]
25 for i in N:
26     Neigh= R[i]
27
28     neigh= [i for i in Neigh.keys() if not i =='root' and not i in N
29 ]
30
31     if not neigh == [] :
32         for i in neigh:
33             if pasado == None:
34                 listNeih.append(i)
35             else :
36                 if not i in pasado:
37                     listNeih.append(i)
38
39 #borrar elementos repetidos
40 unico=[]
41 for i in listNeih:
42     if i not in unico:
43         unico.append(i)
44
45 listNeih= unico
46 return listNeih

```

Se modifica la función `dijkstra_path` de la librería `Networkx`.

```

1 def dijkstra_path(G, source, target, weight='weight',N="N"):
2     """Devuelve la ruta más corta desde el origen al destino en un
3     grafo ponderado G.
4
5     parámetros
6     -----
7     G : NetworkX graph.
8
9     source : node
10           Nodo inicial del camino.
11
12     target : node

```

```

13         Nodo final del camino.
14
15     weight: string, optional (default='weight')
16     Edge data key corresponding to the edge weight.
17
18     N      : lista
19             Lista con torres que pueden ser backhaul
20
21
22
23     Retorna
24     -----
25     path : list
26     Lista de nodos con el camino más corto.
27
28     Raises
29     -----
30     NetworkXNoPath
31     If no path exists between source and target.
32
33     Ejemplos
34     -----
35     >>> G=nx.path_graph(5)
36     >>> print(nx.dijkstra_path(G,0,4))
37     [0, 1, 2, 3, 4]
38
39     Nota
40     -----
41     El peso del atributo debe ser numérico.
42     Las distancias son calculados con la ponderación de
43     los nodos atravesados.
44
45     """
46     (length, path) = single_source_dijkstra
47     (G, source, target=target, weight=weight, N=N)
48     try:
49         return path[target]
50     except KeyError:
51         raise nx.NetworkXNoPath(
52             "node %s not reachable from %s" % (source, target))

```

Al igual que lo propone *bernardi* se modifica la función `dijkstra_path` de la librería `Networkx`. Esta a su vez utiliza la función `single_source_dijkstra_path` que encuentra el camino más corto implementando el algoritmo Dijkstra mediante la función `_dijkstra`, e ingresa como función de ponderación de costo la distancia de enlace entre el nodo raíz al nodo evaluado y la distancia en km de los enlaces utilizando la función de `distancia`.

```

1
2 def single_source_dijkstra(G, source, target=None, cutoff=None,
3 weight='weight', N="N"):
4     """Computa el camino mas corto de las distancias con la
5     ponderación de una función.
6
7     Usa el algoritmo Dijkstra para encontrar el camino mas corto.
8
9     parámetros
10    -----
11    G : NetworkX graph
12
13    source : node
14           Nodo inicial del camino.
15
16    target : node
17           Nodo final del camino.
18
19    cutoff : integer or float, optional
20           Profundidad para detener la búsqueda.
21           Solo se devuelven rutas de longitud <= cutoff.
22
23
24    Retorna
25    -----
26    distance,path : dictionaries
27
28    Devuelve una tupla de dos diccionarios con clave por nodo.
29    El primer diccionario almacena la distancia desde la fuente.
30    El segundo almacena la ruta desde la fuente a ese nodo.
31
32    Examples
33    -----
34    >>> G=nx.path_graph(5)
35    >>> length,path=nx.single_source_dijkstra(G,0)
36    >>> print(length[4])
37    4
38    >>> print(length)
39    {0: 0, 1: 1, 2: 2, 3: 3, 4: 4}
40    >>> path[4]
41    [0, 1, 2, 3, 4]
42
43    Notas
44    -----
45    Implementar una función que da la sumatoria entre la distancia
46    en numero de aristas de distancia al nodo root al nodo actual
47    y la distancia de un enlace.
48
49    Basado en libro "Python cookbook" recipe (119466) de

```

```

50 http://aspn.activestate.com/ASPN/Cookbook/Python/Recipe/119466
51 """
52 def func(u,v, d):
53     if v in N :
54         return 1
55
56     if u in N :
57         return 1
58     node_v_wt = G.nodes[v].get(weight, 1)+distancia(G,u, v)
59     return node_v_wt
60
61 if source == target:
62     return ({source: 0}, {source: [source]})
63
64 if G.is_multigraph():
65     get_weight = lambda u, v, data: min(
66         eattr.get(weight, 1) for eattr in data.values())
67 else:
68     get_weight = lambda u, v, data: func(u,v, data)
69
70 paths = {source: [source]} # diccionario de rutas
71 return _dijkstra(G, source, get_weight, paths=paths,
72                 cutoff=cutoff, target=target)

```

Por último, se tiene la función que implementa el algoritmo Dijkstra

```

1 def _dijkstra(G, source, get_weight, pred=None, paths=None,
2             cutoff=None, target=None):
3     """Implementación del algoritmo Dijkstra con la diferencia
4     que no itera en los vértices, sino sobre los nodos atravesados
5     .
6     parámetros
7     -----
8     G : NetworkX graph
9
10    source : node
11           Nodo inicial del camino.
12
13    get_weight: function
14               Función que retorna el peso del enlace.
15
16    pred: list, optional (default=None)
17          Lista de nodos predecesores.
18
19    paths: dict, optional (default=None)
20           Camino del nodo fuente a nodo objetivo.
21
22    target : node
23           Nodo final del camino.

```

```

24
25     cutoff : integer or float, optional
26         Profundidad para detener la búsqueda. Solo se devuelven
27         rutas de longitud <= cutoff.
28
29     Retorna
30     -----
31
32     distance,path : dictionaries
33
34     Devuelve una tupla de dos diccionarios con clave por nodo.
35     El primer diccionario almacena la distancia desde la fuente.
36     El segundo almacena la ruta desde la fuente a ese nodo.
37
38
39     pred,distance : dictionaries
40         Retorna dos diccionarios que representan una lista de
41     nodos
42         predecesores de un nodo y la distancia de cada nodo.
43
44     distance : dictionary
45         Diccionario del los caminos mas corto con llave y
46         nodo objetivo.
47     """
48     G_succ = G.succ if G.is_directed() else G.adj
49     push = heappush
50     pop = heappop
51
52     dist = {} # dictionary of final distances
53     seen = {source: 0}
54     c = count()
55     fringe = [] # use heapq with (distance,label) tuples
56     push(fringe, (0, next(c), source))
57
58     while fringe:
59         (d, _, v) = pop(fringe)
60         if v in dist:
61             continue # already searched this node.
62         dist[v] = d
63         if v == target:
64             break
65
66         #lista de nodos vecinos
67         lisNeigV=list(G_succ[v].keys())
68
69         for u in lisNeigV:
70
71             cost = get_weight(v, u, len(nx.shortest_path

```

```

72         (G, "root", u))-1)
73
74         if cost is None:
75             continue
76
77         vu_dist = dist[v] + get_weight(v, u,
78         len(nx.shortest_path(G, "root", u))-1)
79
80         if cutoff is not None:
81             if vu_dist > cutoff:
82                 continue
83         if u in dist:
84             if vu_dist < dist[u]:
85                 raise ValueError('Contradictory paths found:',
86                 'negative weights?')
87         elif u not in seen or vu_dist < seen[u]:
88             seen[u] = vu_dist
89             push(fringe, (vu_dist, next(c), u))
90             if paths is not None:
91                 paths[u] = paths[v] + [u]
92             if pred is not None:
93                 pred[u] = [v]
94         elif vu_dist == seen[u]:
95             if pred is not None:
96                 pred[u].append(v)
97
98         if paths is not None:
99             return (dist, paths)
100        if pred is not None:
101            return (pred, dist)
102        return dist

```

### 3.1.2. Evaluar el algoritmo mediante una simulación numérica, comparándolo con Heurística simple

#### verificación

Para verificar el correcto funcionamiento del algoritmo se plantea el mismo diseño propuesto en [7].

- Targeted IncrEase

Para verificar el funcionamiento idóneo del algoritmo, se formula una prueba en dónde se le ingresan valores aleatorios de costo y calor al algoritmo obteniendo la ruta con menos diferencia de *costo – calor*

Municipio	Calor
Silvania	20
Tibacuy	40
Arbelaez	60
Pandi	70
Pasca	80
San Bernardo	80
Venecia	50
Cabrera	40
Granada	10
Fusagasugá	40

Tabla 3.21: Tabla valores aleatorios de calor en los municipios

En la tabla [3.21] se encuentra el valor aleatorio de calor dado a los nodos ubicados en cada municipio de la provincia del Sumapaz.

La tabla [3.22] proporciona la información del valor del costo de cada nodo ubicado en los municipios

La tabla [3.23] se detallan los nodos fuente, estos nodos son aquellos que servirán como backhaul para incrementar la cobertura, se eligen a partir de unas características dadas.

En la tabla [3.24] se especifica los dos nodos objetivo en esta prueba, se eligen los nodos de los municipios más alejados de la provincia.

La figura [3.6] permite identificar los nodos fuentes (nodos de color verde), nodos objetivo de color rojo y los demás nodos ubicados de color azul. Se puede notar que los nodos fuente se encuentran en un extremo de la región del Sumapaz y los objetivo en el otro extremo de la provincia. Esto se hace con el fin de cubrir una mayor extensión de terreno.

Municipio	Costo
Silvania	100
Tibacuy	110
Arbelaez	200
Pandi	150
Pasca	100
San Bernardo	110
Venecia	104
Cabrera	108
Granada	110
Fusagasugá	160

Tabla 3.22: Tabla valores aleatorios del costo de cada nodo en los municipios

Nodos fuente )
-Cabrera - Pandi - Venecia

Tabla 3.23: Nodos fuentes

Nodos objetivo )
-Pasca - Granada

Tabla 3.24: Nodos objetivo

Ruta obtenida )
- Pasca - Tibacuy - Silvania - Granada

Tabla 3.25: Ruta obtenida

La tabla [3.25](#) muestra la mejor ruta que cubre la región del sumapaz, en relación costo-calor.



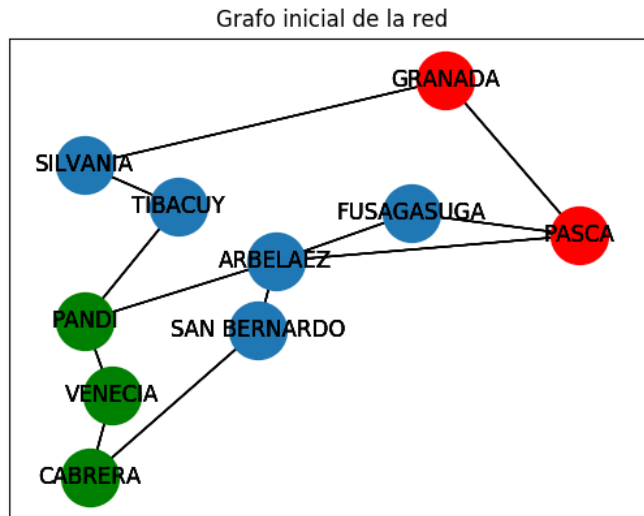


Figura 3.7: Grafo de los nodos Municipales conectados. Fuente (Autores)

- Search IncrEase

Se ha dibujado el grafo que se muestra en la figura 3.8 (a) en dónde se le dió el mismo valor del costo-calor , obteniendo la siguiente respuesta

Nodo	valor
m	60.3
g	46.71
e	23.1
h	18.1

Tabla 3.26: Resultado valor de NPV de los nodos

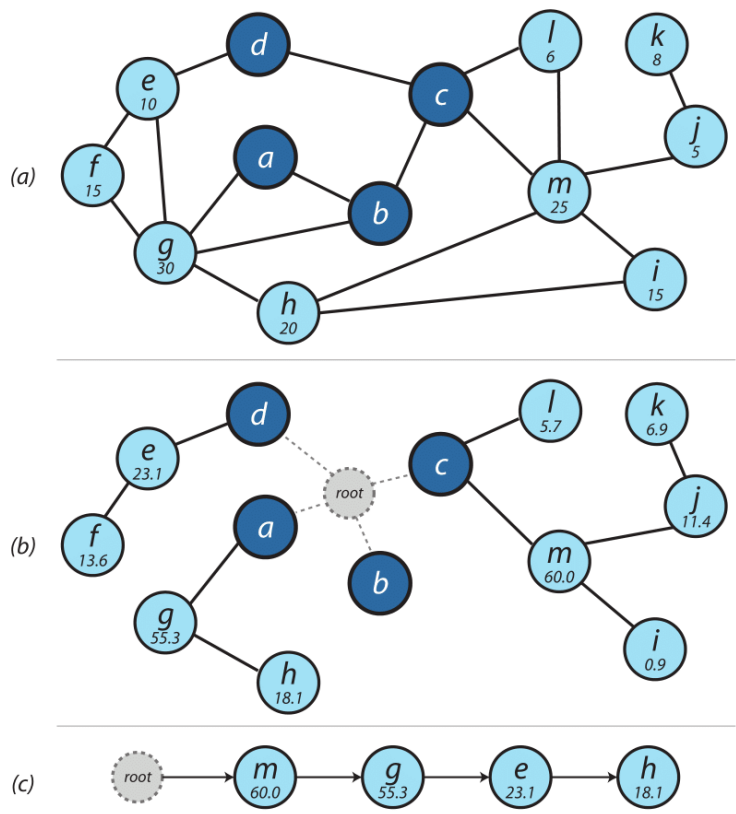


Figura 3.8: Estructuras de datos utilizadas en el modo de operación Búsqueda estratégica (a) grafo G, (b) grafo R, (c) lista L. Fuente [7]

Comparando los valores de la lista de nodos en la figura 3.8 (c) con la tabla 3.21 se encuentra que los resultados obtenidos de NPV son similares a los resultados que obtiene el autor. Esto indica la veracidad del funcionamiento de la función desarrollada.

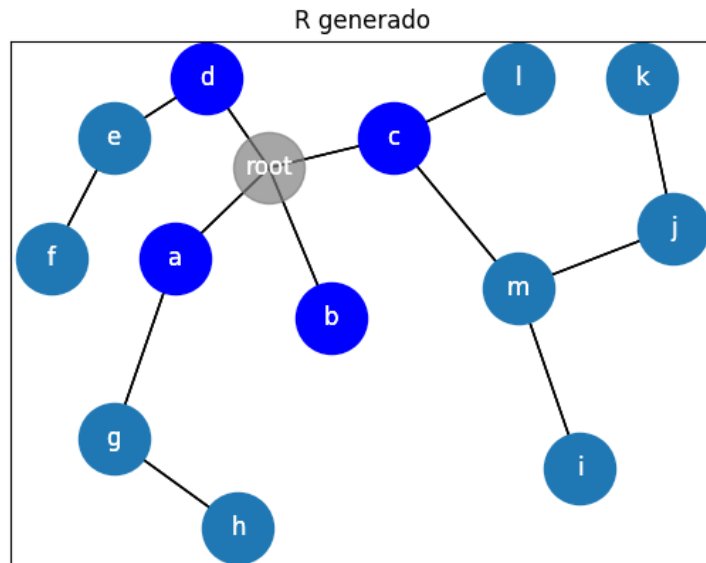


Figura 3.9: Árbol R resultado. Fuente (Autores)

## Pruebas

Para comprobar que el algoritmo genera una topología con el menor valor de costo/-beneficio, se realizaron pruebas utilizando simulaciones numéricas donde se implementa el algoritmo propuesto por *Bernardi* y se comparó con una heurística simple.

Para implementar el algoritmo se creó un grafo  $G$ , con un número aleatorio de nodos  $n$  y vértices  $v$ , luego, a cada nodo  $n$  se le asigna un valor aleatorio de posición  $pos$ , calor  $M$ , costo  $C$  y altura  $h$  de torres para cada uno de los nodos  $n$ . Posteriormente, se ejecuta la función TargetedIncrease con parámetros de entrada  $G$ , un nodo con el menor valor de calor  $H_{min}(n)$  que representará un nodo origen que funcionará como *backhaulrelaing* y un nodo destino con el mayor valor de  $H_{max}(n)$  que supondrá las zonas que se requieren más cobertura. Luego, se implementa la función TC-ALGO para generar un grafo  $G_{hmin}(n)$  con una topología que permite conectar todos los nodos con una altura mínima  $h$  dando como resultado una planeación de menor costo de instalación de infraestructura física.

Esto se comparara con una heurística que consiste en generar un árbol de mínimo de expansión con unas restricciones de tamaño de enlace, luego, al igual que anteriormente se ejecuta el algoritmo TC-ALGO para reducir el valor de costo. Los resultados en ambos casos es un resultado de costo menos beneficio (calor). Esto se realiza en 10 a 30 iteraciones, los resultados se ilustra en la siguiente imagen [3.10](#):

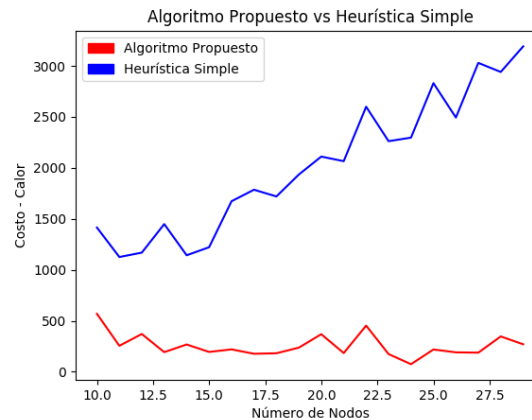


Figura 3.10: Comparación con heurística simple. Fuente (Autores)

### 3.1.3. Aplicar el algoritmo propuesto en la Red Libre de Bosachoque analizando la topología adecuada para futuras expansiones de la red en las Instituciones Educativas Rurales de la región del Sumapaz-Cundinamarca considerando la relación costo-beneficio

Al aplicar el algoritmo propuesto en la red libre de Bosachoque se obtiene:

- Grafo: Topología de la red en la que todos los nodos se encuentran conectados
- Limitar el alcance geográfico:

En la Figura [3.11](#) se puede evidenciar con color amarillo la vereda Bosachoque, lugar en el que se encuentra la red Libre de Bosachoque y en color gris la región del Sumapaz, zona en dónde se desea expandir la red.

En este punto se escogen dos zonas, siendo la primera la vereda Bosachoque (red actual) y la segunda la región del Sumapaz (Futura expansión de la red). Cabe añadir, que la vereda Bosachoque se encuentra ubicada en el municipio de Fusagasugá y hace parte del corregimiento occidental del municipio junto con las veredas El Resguardo, Cucharal, Novillero y Viena. A su vez, Fusagasugá hace parte de los diez municipios que conforman la provincia del Sumapaz en el Departamento de Cundinamarca.

- Solicitudes de cobertura:

Las solicitudes de cobertura se analizaron en las dos regiones, la red actual y la futura expansión de la red.



Figura 3.11: Ubicación de la red actual y ubicación de la futura expansión de la red.  
Fuente (Autores)

#### Red Libre de Bosachoque:

De acuerdo con [18] la red se implementó en la parte alta de la vereda Bosachoque (Parte alta de la vía 40 express) instalando diez puntos conectados a la torre de la vereda San José del Chocho en el municipio de Sylvania (Cundinamarca). Sin embargo, los habitantes de la parte baja de la vereda no tenían acceso a la red, por lo tanto, las personas solicitaron se les provea conectividad a Internet, acorde con esto, se estableció en que coordenadas era posible instalar las antenas y a partir de ahí verificar la población afectada.

En la figura 3.12 se puede encontrar el mapa de calor de las solicitudes de cobertura en la vereda Bosachoque, entendiendo que el color rojo es una solicitud más alta de cobertura y el color verde una solicitud baja. Para realizar este mapa se tomó el dato de la concentración de viviendas que podían acceder al servicio.

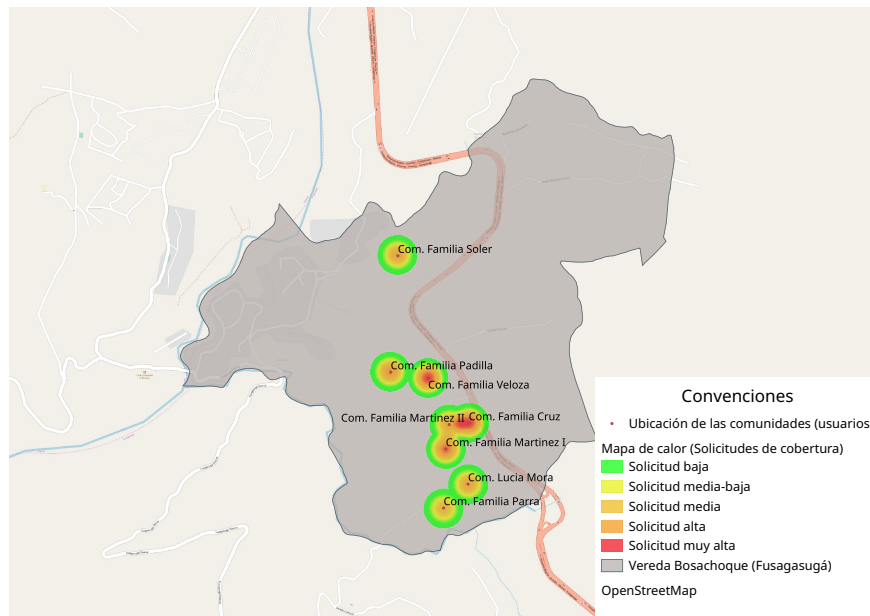


Figura 3.12: Mapa de calor, solicitud de cobertura Boschoque. Fuente (Autores)

### Región del Sumapaz:

Se desea expandir la red libre de Boschoque a la región del Sumapaz, para ello se plantea la interconexión de todas las Instituciones Educativas Rurales de la región. A partir de este hecho, se obtienen las coordenadas de cada Institución y la cantidad de estudiantes por cada sede, (la información es proporcionada por la base de datos del Ministerio de Educación Nacional) %, con estos datos se realiza el mapa de calor.

En la figura [3.13](#), se aprecia la ubicación de las escuelas rurales de la región del Sumapaz (punto de color verde). Cabe resaltar que las I.E Rurales están ubicadas en zonas apartadas o de difícil acceso, lo anterior se aprecia mejor en la figura [3.14](#).

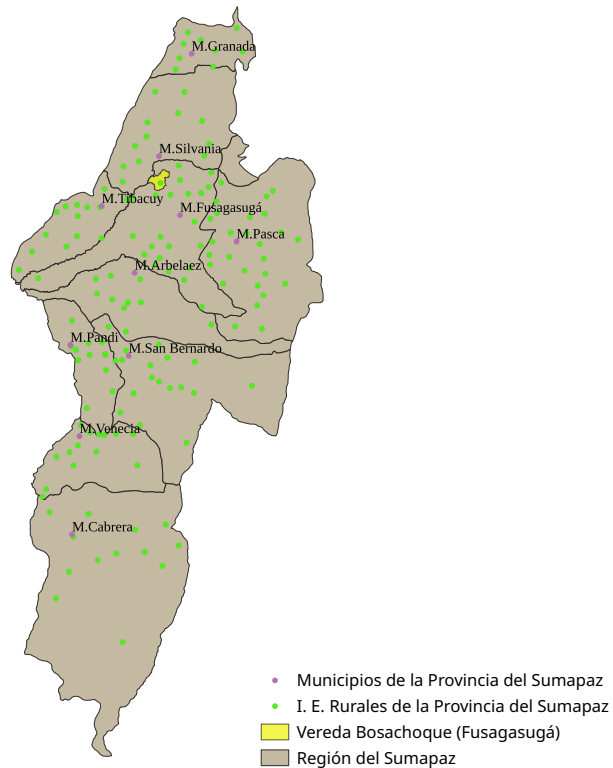


Figura 3.13: Ubicación de las Instituciones Educativas Rurales en el Sumapaz. Fuente (Autores)

La figura 3.14 refleja el relieve de la provincia del Sumapaz (Cundinamarca), en ella se puede apreciar que las Instituciones Educativas Rurales (punto de color rosado) están situadas en zonas bastante alejadas de los centros poblados de los diez municipios de comprenden esta región. Llevar conectividad a Internet a través de redes inalámbricas supone conectar los centros educativos en los que se encuentran una mayor cantidad de estudiantes, esto para permitir el acceso a la red a un amplio número de población.

Por otro lado, en la figura 3.15, se puede visualizar el mapa de calor de las solicitudes de servicio en la provincia del Sumapaz, para este caso se escogió expandir la red libre ubicada en la vereda Bosachoque a intercomunicar las I.E.R del Sumapaz. Entonces, se accede a las base de datos del Ministerio de Educación Nacional dónde se encuentra un archivo con todos los claustros educativos a nivel Nacional, de allí se clasifica la información para los municipios del Sumapaz y posteriormente se selecciona las I.E. Rurales ubicadas en cada municipio. A su vez, para obtener el mapa de calor se hace necesario saber la cantidad de estudiantes por cada escuela, esta información

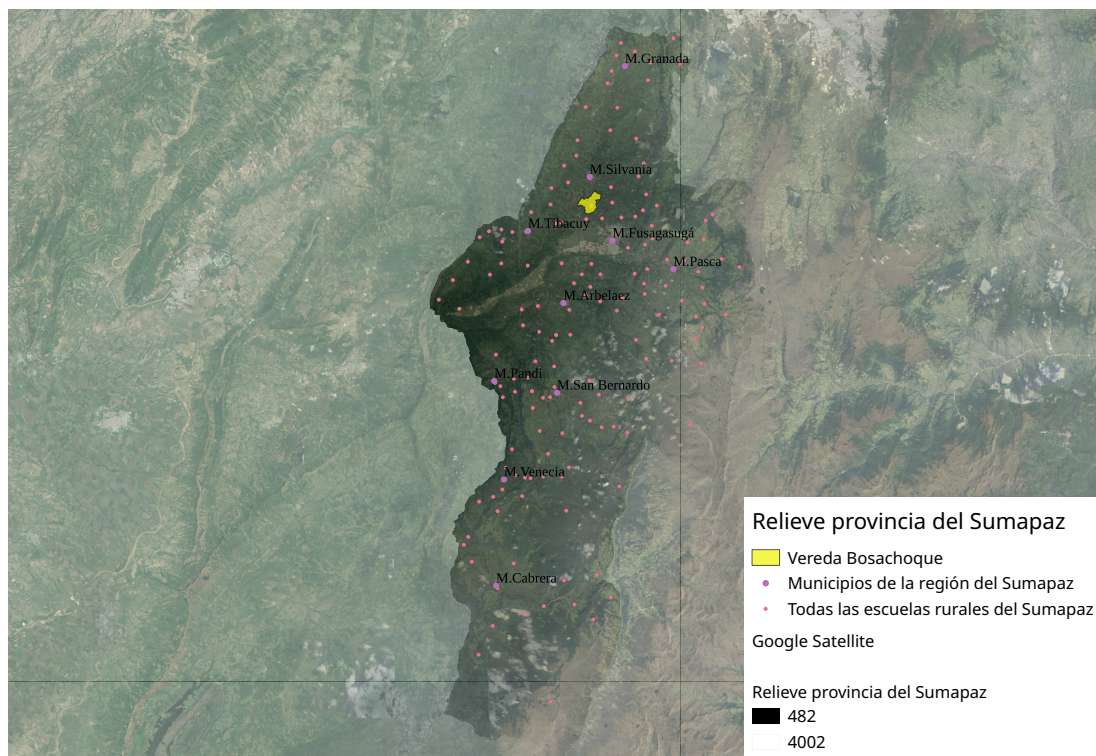


Figura 3.14: Relieve de la región del Sumapaz. Fuente (Autores)

fue obtenida a través de la plataforma "Buscando Colegio" del Ministerio de Educación Nacional y en ella se encuentra los estudiantes vinculados a cada Institución.



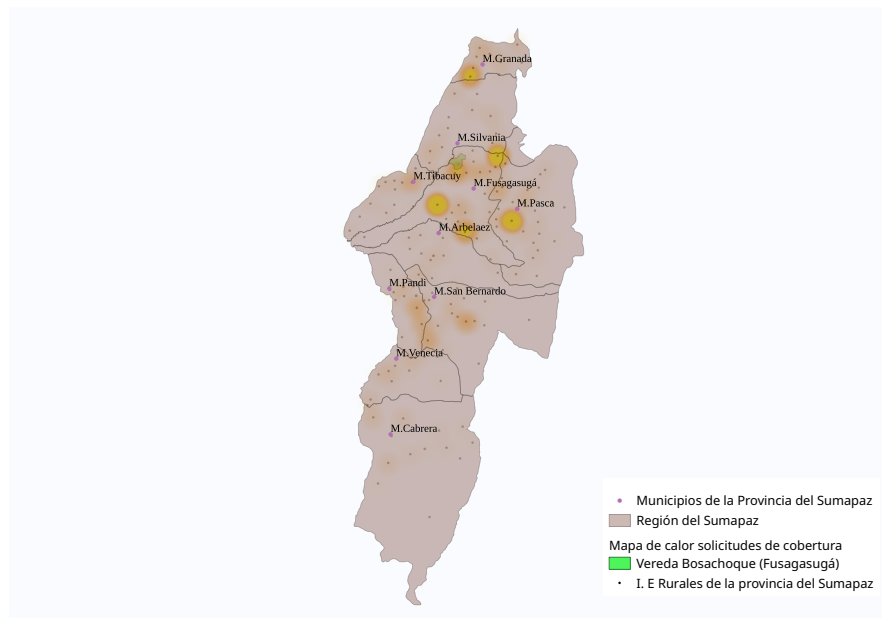


Figura 3.15: Mapa de calor solicitudes en la región del Sumapaz. Fuente (Autores)

En la figura 3.15, se puede visualizar el mapa de calor de las solicitudes de servicio en la provincia del Sumapaz, entonces, a mayor cantidad de estudiantes en la sede mayor, será la cobertura, por ende, el color amarillo simboliza una mayor concentración de estudiantes en las Instituciones Educativas Rurales .

- Ubicación y desempeño de los usuarios actuales:

Partiendo que la red actual se encuentra ubicada en la vereda Bosachoque (municipio de Fusagasugá), es allí dónde se genera el mapa de calor y así se determina el desempeño que han tenido los nodos instalados actualmente. El nivel de desempeño de estos nodos se mide en el rendimiento de cada nodo durante un tiempo determinado.

De acuerdo con la figura 3.16, el color amarillo indica los nodos con mejor desempeño, el color azul brinda la perspectiva de un desempeño medio y el color morado indica un desempeño bajo o sin desempeño. Por ende, la antena ubicada en la “Com. Profe Angela” indica un desempeño alto, al igual que “Don Manuel” y “Don Mario”, sin embargo, los nodos ubicados en “Don Guillermo y Señora Lucero” indican un desempeño alto, esto dado la cercanía de las dos antenas.

De acuerdo con el mapa de calor de la provincia del Sumapaz (figura 3.15) se encuentra que las Instituciones Educativa con mayor concentración de estudiantes (mayor calor) son:

De acuerdo con la tabla 3.28 se encuentra que las escuelas están ubicadas en los municipios de Silvania, Pasca, Tibacuy, Granada y Fusagasugá. A partir de ello se

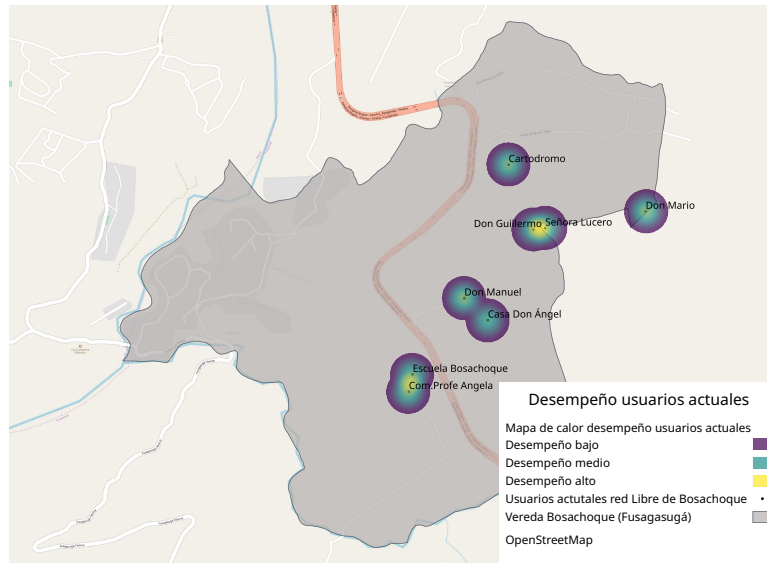


Figura 3.16: Mapa de calor desempeño y ubicación de los usuarios actuales. Fuente (Autores)

Nombre I.E. Rural	Cantidad de estudiantes
Espinalito alto	498
I.E. DEPTAL Adolfo Leon Gómez	449
Francisco José de caldas	422
Escuela rural Antonio Nariño	304
Guavio Bajo	302

Tabla 3.27: Cantidad de estudiantes en las Instituciones Educativas Rurales de acuerdo con el Mapa de calor. Fuente (Autores)

determina que estos municipios podrían ser parte de la red Backhaul, dado que las cabeceras municipales cuentan con conectividad ADSL o de fibra óptica.

En consecuencia, se propone un grafo que conecte las escuelas con más de 300 estudiantes a la red backhaul.

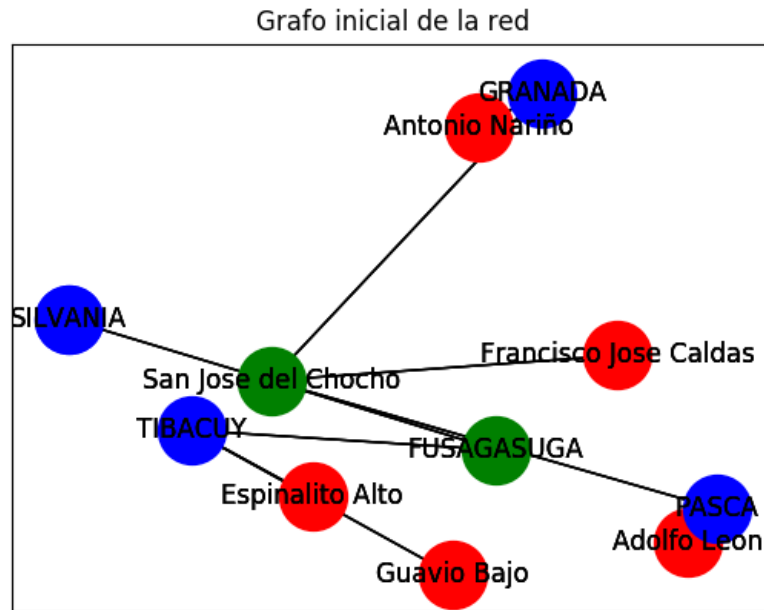


Figura 3.17: Grafo inicial de la red. Fuente (Autores)

En la figura [3.17](#) se representa el grafo inicial de la red, en la que los nodos de color verde corresponden a la red backhaul actual, los nodos de color rojo son los nodos objetivo y los nodos de color azul pertenecen a las cabeceras municipales o futura red Backhaul.

Entonces la red Backhaul actual se encuentra entre el municipio de Fusagasugá y el nodo ubicado en la vereda San José del Chocho en el municipio de Sylvania, por otro lado, las conexiones planteadas son:

La figura [3.18](#) presenta una vista real de la expansión propuesta de la red en la región del Sumapaz, proporcionando conectividad a las escuelas con mayor cantidad de estudiantes matriculados

nodo a	nodo b
Granada	Antonio Nariño
Pasca	I.E. DEPTAL Adolfo Leon Gómez
San José del Chocho	Francisco José de caldas
Granada	San José
Silvania	San José del Chocho
Pasca	San José del Chocho
Tibacuy	Fusagasugá
Tibacuy	Espinalito Alto
Tibacuy	Guavio Bajo

Tabla 3.28: Conexiones del grafo planteado en la figura 3.17

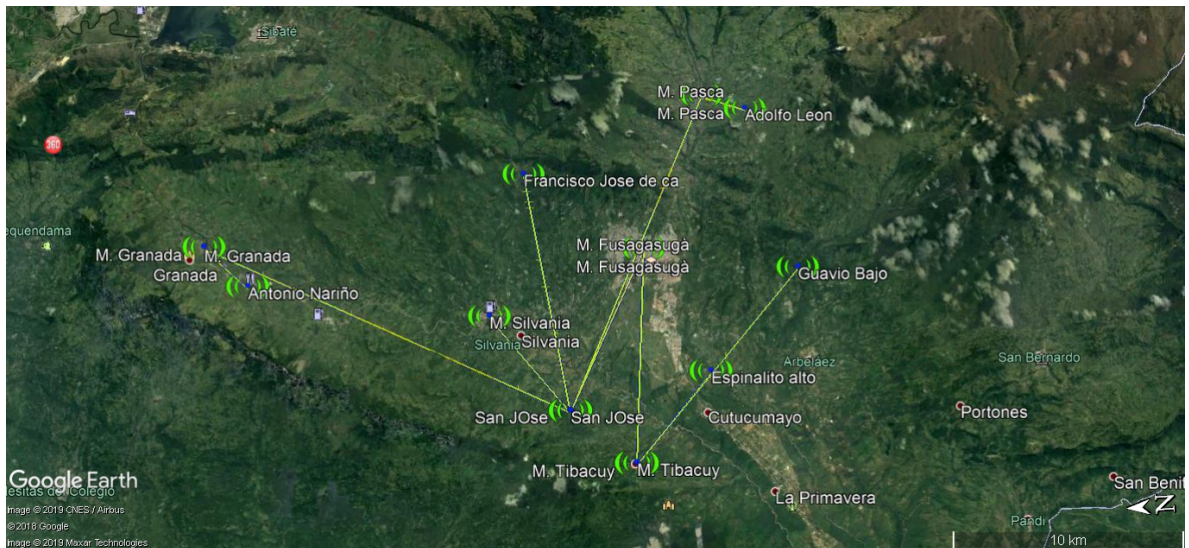


Figura 3.18: Radioenlaces propuestos para expandir la red. Fuente (Autores)

# Capítulo 4

## Análisis de resultados

- Planeación Incremental de la red

A la herramienta IncrEase se le ingresa los datos de la ponderación de los mapas de calor considerando la cantidad de población afectada, para este caso, la cantidad de estudiantes vinculados en las Instituciones Educativas Rurales de la región del Sumapaz, al igual que el grafo generado en la figura [4.1](#).

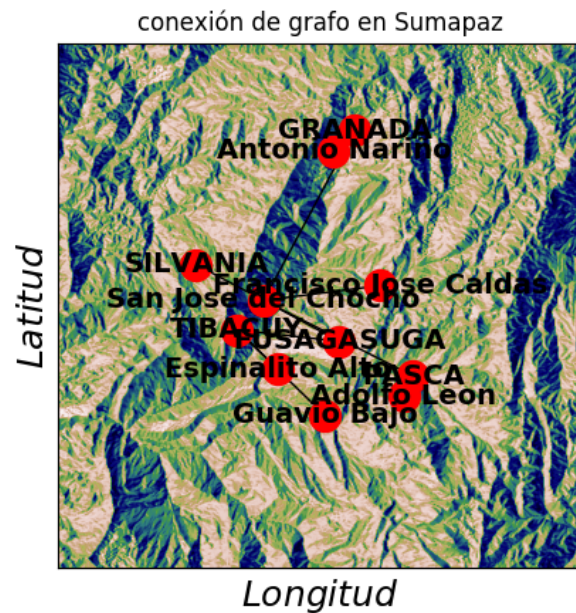


Figura 4.1: Radioenlaces propuestos para expandir la red. Fuente (Autores)

Las conexiones propuestas para el grafo de entrada de la figura 4.1 se evidencian en la tabla 3.28

### Targeted Increase

Nodos fuente (implementación)
-Municipio de Fusagasugá - San José del Chocho

Tabla 4.1: Nodos fuente en la implementación del algoritmo para expandir la red

En el cuadro 4.1 se identifican las dos torres disponibles actualmente instaladas dentro de la red libre de Bosachoque, correspondientes al nivel Backhaul de la red. Ubicados en la universidad de Cundinamarca (sede Fusagasugá) y en la vereda San José del Chocho municipio de Silvania.

Nodos objetivo (implementación)
- Espinalito alto - I.E.DEPTAL Adolfo León Góme - Francisco José de Caldas - Escuela rural Antonio nariño - Guavio Bajo

Tabla 4.2: Nodos objetivo en la implementación del algoritmo para expandir la red

De acuerdo al mapa de calor de las solicitudes de cobertura de la región del Sumapaz (Figura 3.15) y considerando que a mayor cantidad de estudiantes la tonalidad del color es más fuerte, se determinada los nodos objetivo, que son aquellos claustros educativos con una cantidad mayor a 300 estudiantes matriculados. Por ende la tabla 4.2 entrega las escuelas que cumplen con este requisito.

De acuerdo con la figura 4.2 se encuentra que la ruta con menor costo y mayor beneficio es la conexión de la I.E Francisco José de Caldas con la torre ubicada en San José del Chocho, ya que esta conexión beneficiaría alrededor de 422 estudiantes, además de tener línea de vista directa sin obstrucciones.

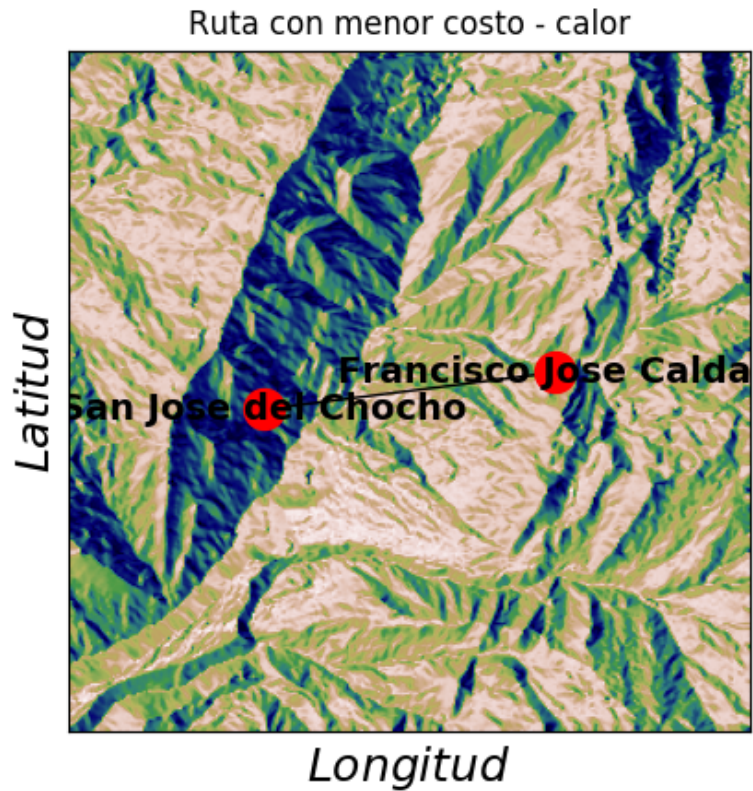


Figura 4.2: Ruta con menor costo-calor. Fuente (Autores)

Debido a que el resultado arroja una ruta de dos nodos, no se ingresa al algoritmo TC-ALGO, puesto que se supone que se debe trabajar con la mínima altura para lograr un sólo enlace. La altura definida de la torre en San José del Chocho es de 4m, por otro lado, en la escuela basta con una infraestructura elevada en la que se pueda ubicar una antena dirigida al nodo San José del Chocho

- Search IncrEase

Al algoritmo Search IncrEase le ingresa el grafo dado en la figura 4.1 y la misma ponderación de los mapas de calor generados en la figura 3.15, además se utiliza el coeficiente de ganancia de 5%, es decir  $c = 0,05$ .

Este algoritmo genera el árbol  $R$ , que son las torres que se pueden conectar directamente a la red.

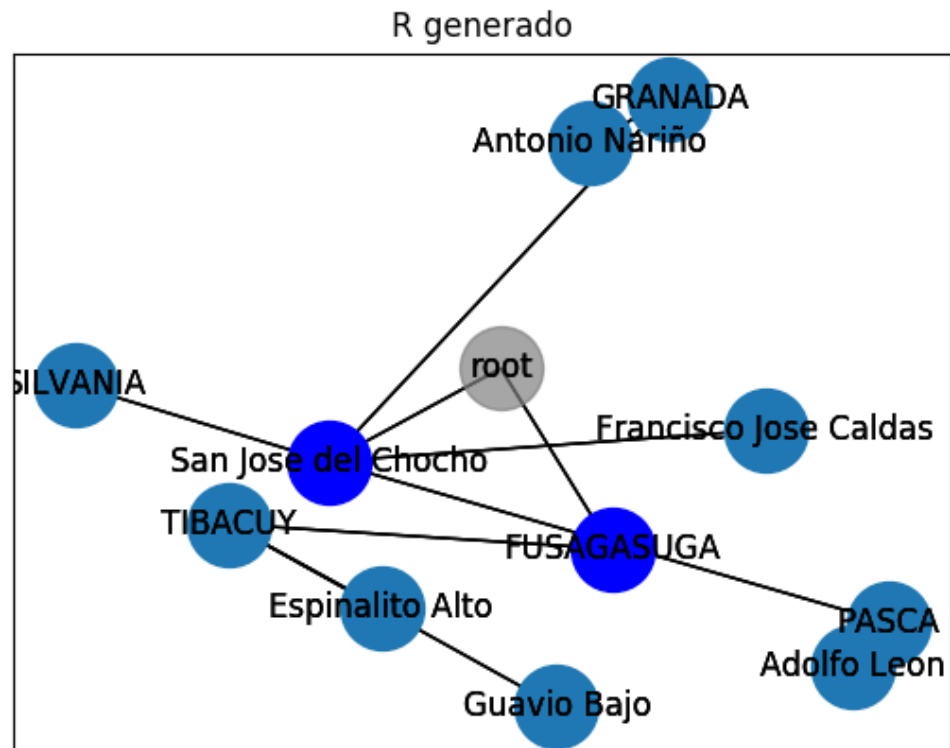


Figura 4.3: Grafo R. Fuente (Autores)

A partir de la figura 4.3 se evidencia que las torres que se encuentran disponibles y que se pueden conectar directamente a la raíz (nodo de color gris), son los nodos de San José del Chocho y el nodo de Fusagasugá.



Nodo	valor
Silvania	951.4285714285714
Pasca	1451.2018140589569
Granada	1582.721088435374
Tibacuy	2039.8639455782313
Espinalito alto	455.328798185941
Adolfo león	499.7732426303855
Francisco José de Caldas	550.4761904761905
Antonio Nariño	633.1065759637188
Guavio Bajo	Guavio Bajo

Tabla 4.3: Resultado valor de NPV de los nodos de la implementación

Según los resultados obtenidos en el cuadro [4.3](#), de la topología propuesta, si un proveedor de servicio de Internet quisiera realizar una inversión inicial, el nodo de Tibacuy proporcionaría un mayor retorno de inversión y por ende se recomendaría instalar este nodo primero. Seguido por la instalación del nodo ubicado en el municipio de Granada y así continuando la instalación respecto al valor presente neto.

## 4.1. Conclusiones y trabajos futuros

Las zonas rurales a diferencia de las áreas urbanas presentan menos densidad de la población y cuentan con un poder adquisitivo limitado, lo que conlleva a un bajo retorno en la inversión por parte de los ISP dificultando la presencia de infraestructura de redes en estas regiones, además, los usuarios se encuentran separados por grandes distancias unos de otros, por esta razón, se hace difícil llevar conectividad a Internet con tecnologías cableadas como la red cableada de telefonía ADSL, dado que la distribución de esta red resulta costosa en comparación con las tecnologías inalámbricas.

Por lo anterior y en el estudio realizado, se encontró que la mejor solución de conectividad a Internet para el planeamiento de redes rurales inalámbricas y a su vez disminuir la brecha digital entre las zonas rurales y las zonas urbanas se da a través de redes BWA, utilizando el estándar IEEE 802.11 dado que permite realizar enlaces de larga distancia a un bajo costo, gracias a la economía de escala (producción en masa) que permite la adquisición de los equipos a precios bajos. Esto en comparación con otras tecnologías inalámbricas como IEEE 802.16 (WiMax).

Por otro lado, en cuanto a la planeación de redes BWA se encontró que el mayor costo en la construcción de la topología de la red inalámbrica en zonas rurales, radica en la construcción de las torres o los mástiles respecto al costo de los demás elementos que componen la infraestructura de la red, por esta razón, disminuir estos costos es el principal parámetro para optimizar.

Se propone un algoritmo para la planeación de redes inalámbricas rurales que permite encontrar la mejor ruta en la relación costo-beneficio, a la vez plantea los nodos que tendrán mejor retorno de inversión en la construcción de la infraestructura física de la red. Para desarrollar este algoritmo se implementan los algoritmos planteados en [7, 29, 23], dando como resultado un modo de operación del algoritmo propuesto planteado en cuatro ítems:

- Entrada
- Planeación incremental de la red
- Planeación del mínimo costo de infraestructura
- Salida

En la sección **entrada** se ingresa un grafo  $G$  con una topología propuesta de expansión de la red, a la vez, el área geográfica dónde se desea expandir la red actual y los mapas de calor de las solicitudes de cobertura, considerando la ubicación y desempeño de los usuarios actuales, el primer mapa haciendo alusión a la región del sumapaz (figura 3.15) y el segundo a la red libre de Boschoque (figura 3.16). Para la **Planeación incremental de la red** se implementa la herramienta **IncrEase** desarrollada en [7

con sus dos modos de operación, el primero **Targeted IncrEase** que proporciona la ruta más óptima en relación costo-beneficio con mayor cobertura y **Search IncrEase** que elabora una lista de nodos que se pueden conectar al árbol  $R$ . Ahora bien, en la **Planeación del mínimo costo de infraestructura** se implementa el algoritmo TC-ALGO propuesto en [3] implementado por [23] y se obtiene como **salida** un grafo con una ruta de mínimo costo de infraestructura.

Una vez se verifica el funcionamiento correcto del algoritmo, se somete a pruebas en dónde se compara con una heurística simple para determinar cual de los dos resultados tiene mayor relación costo-beneficio dado por el valor resultante de la mínima diferencia entre *costo* – *calor*, de dónde resulta que el algoritmo propuesto da una mejor respuesta obteniendo una reducción en la diferencia de la relación costo-beneficio en un 68 % en comparación con el resultado obtenido por la heurística simple (Figura 3.10)

Entonces, entendiendo la veracidad del algoritmo propuesto, este se implementa en la red libre de Bosachoque, sin embargo, la ubicación de la vereda imposibilita usar los nodos instalados para expandir la red desde estos puntos, ya que la geografía del lugar es muy accidentada. Sin embargo las torres disponibles de la red Backhaul si ofrecen la posibilidad de expandir la red ya que su ubicación permite línea de vista a diferentes puntos de la región del Sumapaz. Una vez analizado el relieve del terreno y los mapas de calor, se propone una topología que permita conectar las cabeceras municipales con línea de vista a San José del Chocho y redistribuir la señal a las escuelas que tienen mayor ponderación de calor (zonas que requieren mayor cobertura), ver figuras 3.15, 3.13, 4.1 y cuadro 3.28.

Una vez ejecutado el algoritmo propuesto da como resultado que para expandir la red libre de Bosachoque (red actual) a las Instituciones Educativas Rurales de la región del Sumapaz la ruta con mayor relación costo-beneficio es el enlace entre los nodos San José del Chocho y la escuela Francisco José de Caldas ubicada en el municipio de Sylvania, ya que afecta a una población aproximada de 422 estudiantes y el nodo que proporciona mayor retorno de inversión en el despliegue de la infraestructura inicial para conectar la red de expansión es la cabecera municipal de Tibacuy.

- Trabajos futuros

Proponer el diseño de un software que integre el algoritmo planteado en el presente trabajo con un sistema de información geográfico que permita manipular el terreno dónde se desea expandir la red, que proporcione un servidor para el almacenamiento de los datos con los que se formaran los mapas de calor, considerando aspectos demográficos y económicos de las población dónde se desee trabajar.

# Bibliografía

- [1] Unión Internacional de Telecomunicaciones UIT. *impact of broadband on the economy*. Regulatory & market environment, 2012.
- [2] Álvaro Rendon Gallon, Patricia Jeanneth Ludeña González y Andres Martinez Fernandez, eds. *Tecnologías de la Información y las Telecomunicaciones para zonas rurales*. MASERATTI: Mejora de la atención sanitaria en entornos rurales mediante aplicaciones de telemedicina sobre tecnologías inalámbricas, 2011.
- [3] Debmalya Panigrahi y col. “Minimum cost topology construction for rural wireless mesh networks”. En: *IEEE INFOCOM 2008-The 27th Conference on Computer Communications*. IEEE. 2008, págs. 771-779.
- [4] de la División de Desarrollo Productivo y Empresarial de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Edwin Fernando Rojas y Laura Poveda. “Estado de la banda ancha en América Latina y el Caribe”. En: *Publicación de las Naciones Unidas* (2017).
- [5] Comisión de Regulación de Telecomunicaciones. “Definición de Banda Ancha para Colombia”. En: *Regulación de Infraestructura* (2016).
- [6] Santiago Florez. “Diseño e Implementación de un Sistema de Gestión para la Red Inalámbrica Comunitaria Bosachoque Libre.” En: *Universidad de Cundinamarca* (2018).
- [7] Giacomo Bernardi. “Deployment and Operational Aspects of Rural Broadband Wireless Access Networks”. Tesis doct. University of Edinburgh, 2012.
- [8] Organización Naciones Unidas : Consejo Económico y Social. “El acceso de banda ancha a Internet como medio de lograr una sociedad digital inclusiva”. En: *Comisión de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo 16 período de sesiones* (2013).
- [9] Programa de las Naciones unidas para el Desarrollo PNUD. *Índices e indicadores de desarrollo humano*. Inf. téc. Organización de las Naciones Unidas ONU, 2018. URL: [http://hdr.undp.org/sites/default/files/2018\\_human\\_development\\_statistical\\_update\\_es.pdf](http://hdr.undp.org/sites/default/files/2018_human_development_statistical_update_es.pdf).

- [10] Marc St-Hilaire. “Topological planning and design of UMTS mobile networks: a survey”. En: *WIRELESS COMMUNICATIONS AND MOBILE COMPUTING* 9 (jul. de 2008), pág. 11.
- [11] Sandro Bosio ; Antonio Capone y Matteo Cesana. “Radio Planning of Wireless Local Area Networks. IEEE/ACM Transactions on Networking”. En: *IEEE/ACM Transactions on Networking* 15 (2007), 6:1414-1427. ISSN: 1063-6692.
- [12] Wilson Gordillo. “Redes Libres- Enlaces digitales con sentido social.” En: *ENGI. Revista electrónica de la Facultad de Ingeniería, Universidad de Cundinamarca* 2 (2013), 2: 11-13.
- [13] Rob (Ed.) Flickenger. *REDES INALMBRICAS EN LOS PAISES EN DESARROLLO : Una guía practica para planificar y construir infraestructuras de telecomunicaciones de bajo costo*. Vol. 4. Hacker Friendly LLC, 2013. ISBN: 978-1492390855. URL: <http://wndw.net/>.
- [14] guifi.net. *Guifi.net- El proyecto tecnológico*. Dic. de 2016. URL: <https://guifi.net/es/proyecto-tecnologico>.
- [15] Johnathan Ishmael ; Sara Bury ; Dimitrios Pezaros y Nicholas Race. “Deploying Rural Community Wireless Mesh Networks”. En: *IEEE Internet Computing* 12 (2008), 8:22-29. ISSN: 1089-7801.
- [16] Luis F. Pedraza ; Carlos A. Gómez y Octavio Salcedo P. “Implementación de red inalámbrica comunitaria para Ciudad Bolívar”. En: *Visión Electrónica* 2 (2012), 11:46-47.
- [17] Brian Alberto Achury Mejia. “Análisis de los Parametros de Calidad del Servicio (QOS) Proporcionados por una Plataforma de Comunicaciones Convergetes Basada en Linux, a través de Radioenlaces Inalámbricos para la Vereda Bosachoque, en el Municipio de Fusagasugá (Cundinamarca)”. En: *Universidad de Cundinamarca* (2018).
- [18] Brayan Alberto Tobon Perdomo. “INFRAESTRUCTURA DE RED FISICA, EN LA VEREDA BOSACHOQUE DEL MUNICIPIO DE FUSAGASUGÁ.” En: *Universidad de Cundinamarca* (2018).
- [19] Sayandeep Sen. “Topology Planning for Long Distance Wireless Mesh Networks”. Tesis de mtría. Indian Institute of Technology, 2006.
- [20] IBM. *Redes y planificación de redes*. 2019. URL: [https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/es/SSFKSJ\\_7.5.0/com.ibm.mq.pla.doc/q004730\\_.htm](https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/es/SSFKSJ_7.5.0/com.ibm.mq.pla.doc/q004730_.htm).
- [21] R. Whitaker y S. Hurley. “Evolution of planning for wireless communication systems.” En: *Proc. of Annual Hawaii Int. Conference on System Sciences* (2003), pág. 10.

- [22] M.A Abido. "Optimal Power Flow Using Tabu Search Algorithm". En: *Electric Power Components and Systems* (2002), págs. 469-483.
- [23] Milton Ríos Rivera y Leonardo Rodríguez Mújica. "Solución al problema de construcción de la topología en redes rurales inalámbricas". En: *IEEE Colombian Conference on Communication and Computing (IEEE COLCOM 2015) I* (jul. de 2015), págs. 1-9. ISSN: 978-1-4799-8834-1.
- [24] NetworkX. *Overview of NetworkX*. Abr. de 2019. URL: <https://networkx.github.io/documentation/stable/#>.
- [25] Edoardo Amaldi, Antonio Capone y Federico Malucelli. "Planning UMTS base station location: Optimization models with power control and algorithms". En: *IEEE Transactions on wireless Communications* 2.5 (2003), págs. 939-952.
- [26] L. Raisanen y R. M. Whitaker. "Comparison and evaluation of multiple objective genetic algorithms for the antenna placement problem". En: *Mobile Networks and Applications* 10 (feb. de 2005), págs. 79-88.
- [27] F. Gordejuela-Sanchez, A. Juttner y J. Zhang. "A multiobjective optimization framework for IEEE 802.16e network design and performance analysis." En: *Proc. of IEEE Journal on Selected Areas in Communications* (2009).
- [28] Beatriz Ordóñez Nava y Abraham Mora Cuevas. "DISEÑO DE UNA INTERFAZ GRÁFICA PARA EL MODELADO DE REDES INALÁMBRICAS DE BANDA ANCHA". Tesis doct. Universidad Nacional Autónoma de México, jun. de 2016. URL: [http://profesores.fi-b.unam.mx/victor/LTesis\\_Beatriz\\_Abraham.pdf](http://profesores.fi-b.unam.mx/victor/LTesis_Beatriz_Abraham.pdf).
- [29] Sayandeep Sen y Bhaskaran Raman. "Long distance wireless mesh network planning: problem formulation and solution." En: *ACM Int. conference on World Wide Web (WWW)* (mayo de 2007), págs. 893-902.
- [30] Bhaskaran Raman y Kameswari Chebrolu. "Design and evaluation of a new MAC protocol for long-distance 802.11 mesh networks". En: *Proceedings of the 11th annual international conference on Mobile computing and networking*. ACM. 2005, págs. 156-169.
- [31] César Casas y col. *Realización del estudio de factibilidad, socialización y capacitación. para implementación de infraestructuras de voz Ip y comunicaciones convergentes en la región del Sumapaz*. Inf. téc. Universidad de Cundinamarca, 2014.
- [32] QGIS Project. *QGIS User Guide*. Oct. de 2019. URL: <https://docs.qgis.org/3.4/pdf/es/QGIS-3.4-UserGuide-es.pdf>.
- [33] Steven S Skiena. *The algorithm design manual: Text*. Vol. 1. Springer Science & Business Media, 1998.