

# Índice general

<b>1 Capítulo 1. El problema</b>	<b>2</b>
1.1 Planteamiento del problema . . . . .	2
1.2 Objetivos del estudio . . . . .	3
1.2.1 Objetivo general . . . . .	3
1.2.2 Objetivos específicos . . . . .	3
1.3 Justificación . . . . .	4
1.3.1 Beneficios tecnológicos . . . . .	4
1.3.2 Beneficios institucionales . . . . .	5
1.3.3 Beneficio social . . . . .	5
1.4 Alcances y limitaciones . . . . .	5
1.4.1 Alcances . . . . .	5
1.4.2 Limitaciones . . . . .	6
<b>2 Capítulo 2. Marco referencial</b>	<b>6</b>
2.1 Antecedentes . . . . .	6
2.1.1 Descripción de la red de Bosachoque Libre . . . . .	8
2.2 Marco Teórico . . . . .	9
2.2.1 Brecha Digital . . . . .	9
2.2.2 Redes Libres Comunitarias . . . . .	9
2.2.3 Planeación de Redes Inalámbricas . . . . .	12
2.2.4 Algoritmos utilizados en la planeación . . . . .	12
2.2.5 Representación de la topología . . . . .	13
2.3 ESTADO DEL ARTE . . . . .	15
2.3.1 Planeación de redes móviles UMTS . . . . .	15
2.3.2 Redes WiMAX . . . . .	20
2.3.3 Redes BWA en zonas Rurales . . . . .	21
<b>3 Capítulo 3. Diseño metodológico</b>	<b>32</b>
3.1 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 . . . . .	32
3.1.1 Recolectar información de planeación incremental de redes inalámbricas . . . . .	33
3.1.2 Analizar la información recopilada de redes inalámbricas enfocada a zonas rurales . . . . .	33
3.1.3 Determinar la información que cumpla con los requerimientos necesarios para diseñar el algoritmo . . . . .	34
3.1.4 Documentar el estado del arte . . . . .	34

3.2	Diseñar un algoritmo que permita identificar la mejor estrategia de expansión de la red inalámbrica en zonas rurales . . . . .	35
3.2.1	Análisis de requerimientos . . . . .	35
3.2.2	Determinar los requerimientos necesarios para ejecutar el algoritmo . . . . .	40
3.2.3	Diseño . . . . .	43
3.3	Evaluuar el algoritmo mediante una simulación numérica, comparándolo con Heurística simple . . . . .	58
3.3.1	verificación . . . . .	58
3.3.2	Pruebas . . . . .	58
3.4	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	59
<b>4</b>	<b>Capítulo 4. Análisis de resultados y discusión</b>	<b>63</b>
<b>5</b>	<b>Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>63</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>63</b>

# 1 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 (Edwin Fernando Rojas y Laura Poveda 2017), 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 el ancho de banda para las zonas rurales, para el año 2020: 1 Mbps a 10 Mbps de bajada y de 512 Kbps a 1Mbps (Regulación de Telecomunicaciones 2016), lo cual, si comparamos esto con los datos actuales que se tienen del ancho de banda en la red libre de Bosachoque (Florez 2018), 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 WISP solo pueden tomar dos acciones para extender su cobertura de banda ancha, estas son Incrementar la cobertura de red, o mejora 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, sin embargo, existen 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 (en este caso la Universidad de Cundinamarca) (Bernardi 2012). 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 como 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 (Consejo Económico y Social 2013).

¿Cómo planificar la expansión estratégica de la Red Libre de Bosachoque con un algoritmo de planificación de redes inalámbricas en zonas rurales?

## 1.2 Objetivos del estudio

### 1.2.1 Objetivo general

Diseñar un algoritmo para la planeación incremental de redes inalámbricas en áreas rurales evaluándolo en la red Libre de Bosachoque

### 1.2.2 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 diseñado en la red libre de Bosachoque analizando los resultados obtenidos

## **1.3 Justificación**

El acceso a Internet de banda ancha 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 (Telecomunicaciones UIT 2012), 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 (Programa de las Naciones unidas para el Desarrollo PNUD 2018), sugiere a todas las naciones miembros de la ONU (“Organización de las Naciones Unidas”) aumentar los esfuerzos de 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 o actualización de la red. En la actualidad, se encuentran toneladas de software para la planeación de redes, sin embargo, estas están enfocadas al planeamiento de redes de banda ancha de telefonía móvil (St-Hilaire 2008) y redes inalámbricas locales WLAN (Antonio Capone y Matteo Cesana 2007), mientras que para la planificación de redes BWA en zonas rurales estos enfoques son limitados por la comunidad de investigación.

Nuestro enfoque está basado en las necesidades de guiar 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 anteproyecto, 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 presente software en la Red Libre de Bosachoque, en donde se evaluará los resultados.

### **1.3.1 Beneficios tecnológicos**

Se dará a conocer una nueva perspectiva a las WISP en la planificación de redes BWA en zonas rurales, incentivando la conectividad y accesibilidad a la banda ancha, además de que tendrá accesibilidad a la herramienta , puesto que se tiene previsto el desarrollo de un software libre, el cual podrá ser propenso a actualizaciones o mejoras por parte de la comunidad tecnológica,

además de que fomentará la posibilidad de generar otras herramientas de software para la solución de problemas de optimización y planeación de redes.

### **1.3.2 Beneficios institucionales**

El desarrollo del proyecto permitirá al programa de ingeniería electrónica de la Universidad de Cundinamarca a contar con una herramienta que permita el desarrollo económico de la comunidad rural del municipio (vereda de Bosachoque) y demás lugares donde esta herramienta se pueda implementar, además que permitirá mejorar el servicio como WISP, que presta la Universidad en la Red Libre de Bosachoque. También permitirá el fortalecimiento del semillero de investigación Kinestasis, fomentando el desarrollo de herramientas tecnológicas al servicio de la sociedad.

### **1.3.3 Beneficio social**

La herramienta permitirá sugerir las mejores decisiones al momento de planear una red o mejorar la cobertura de Internet de banda ancha, llevando consigo un desarrollo económico, puesto que la comunidad podrá tener a su disposibilidad un sin fin de herramientas que permitan generar un desarrollo económico en el entorno, además de fortalecer el sector rural y disminuir la brecha digital que existe en los países en desarrollo.

## **1.4 Alcances y limitaciones**

### **1.4.1 Alcances**

El presente proyecto tiene como objeto diseñar un algoritmo para la planeación incremental de redes inalámbricas que permita sugerir las mejores opciones para incrementar la cobertura de ancho de banda y acceso a internet en zonas rurales. Este algoritmo se implementará y evaluará en la red libre comunitaria de Bosachoque, se espera que sea una herramienta adecuada que permita la toma de decisiones al momento de planificar la expansión de la red, además se plantea la base para desarrollar futuros trabajos en el campo de las redes y las telecomunicaciones como puede ser el diseño de un software.

#### **1.4.2 Limitaciones**

El proyecto estará limitado por la infinidad de soluciones válidas para realizar la planeación incremental de una red 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.

## **2 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 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(Rendon Gallon, Patricia Jeanneth Ludeña González, and Fernandez 2011).

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 (Gordillo 2013).

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 (WCN) (Flickenger 2013) . Además, en este tipo

de redes, se emplean materiales que pueden ser adquiridos por la comunidad, y donde este autor muestra una guía detallada para realizar conexiones inalámbricas, que permitan conectar con un ancho de banda significativo lugares remotos y de difícil acceso, además de tener un enfoque orientado a países en desarrollo. 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), este es un proyecto tecnológico, social y económico, impulsado desde la ciudadanía que tiene por objetivo la creación de una red de telecomunicaciones abierta, libre y neutral, basada en un modelo de procomún (guifi.net 2016). 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. Sin embargo, el éxito de esta red no radica especialmente en la gran cobertura que ofrece y de cómo ha sido el impacto en los países en que se ha desarrollado, sino que según (Roger 2015), ha permitido mostrar la importancia de mantener la infraestructura de la red como bien colectivo ya que el principio subyacente detrás de guifi.net es la firme convicción de que la mejor manera de mantener una red es estableciéndola como un recurso colectivo común (CPR).

A pesar que gran parte de los nodo 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, la WCN ha tenido gran participación en zonas rurales, en este enfoque se destaca una red inalámbrica 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 (Sara Bury ; Dimitrios Pezaros y Nicholas Race 2008). Esto a pesar de haber tenido algunas limitaciones y complicaciones, muestra cómo se tuvo que reeducar a la gente para que se pueda hacer uso de la red de la mejor manera, dando como resultado la disponibilidad de banda ancha y mejorando la calidad de los servicios que se prestan.

En el ámbito local, en Bogotá se han desplegado diferentes redes inalámbricas comunitarias, las cuales valen la pena resaltar a pesar de no ser un entorno rural, estas muestran la forma de cómo se puede hacer inclusión social a sectores populares, en esta aparece (Carlos A. Gómez y Octavio Salcedo P. 2012), 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 (Flickenger 2013) , demostrando, que la participación de la ciudadanía es fundamental para el éxito de estas redes.

### **2.1.1 Descripción de la red de Bosachoque Libre**

La Red Bosachoque Libre es un macroproyecto misional de investigación de la Universidad de Cundinamarca de Facultad de Ingeniería (redes libres como alternativa de innovación social e inclusión digital en la vereda Bosachoque del municipio de Fusagasugá), con el fin de proveer servicio de Internet a la vereda Bosachoque 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 (Mejia 2018).

La red de Bosachoque fue planeada e implementada como una red BWA (acceso inalámbrico de banda ancha “Broad Band Wireless Access”) de dos niveles, nivel de back-haul donde de manera inalámbrica se adquiere el servicio de internet y nivel de acceso donde se conectan los usuarios finales. El nivel back-haul 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 (PMP).

La universidad de Cundinamarca sede Fusagasugá hace la función de proveedor de servicio de Internet (ISP) con el fin de desarrollar y ejecutar el macroproyecto mencionado.

Para el diseño, se especificó un DNS, este se tomó a partir del DNS asignado a la universidad de Cundinamarca, el cual es 200.14.41.2 y, como respaldo se utilizó el DNS de Google 8.8.8.8, además, la red cuenta con servicios de DHCP y firewall, cumpliendo con las especificaciones de enrutamiento y seguridad que una red de esta magnitud debe tener.

El dimensionamiento del número de usuarios se estableció según el POT (plan de ordenamiento territorial) 2014, cuyos datos reposan de manera oficial en la alcaldía de Fusagasugá, donde se consta que en esta población rural se encuentran un número aproximado de 4000 personas, por ende, el direccionamiento está diseñado para suplir de servicio de Internet a la comunidad a un total de 4000 Host.

En este nivel se utiliza un enrutador y una antena Access Point ubicada en la Universidad de Cundinamarca específicamente en el bloque F, donde por medio de un enlace punto a punto (PTP) y utilizando dos antenas RocketM5 AC a una frecuencia de trabajo entre 5.2 GHz 5.8 GHz , se dirige a un punto ubicado en la vereda San José del Chocho del municipio

de Silvania-Cundinamarca; Aquí se encuentra el nivel de acceso , donde un enlace multipunto con topología anillo se encarga de la distribución de la señal por medio de una antena sectorial Rocket Prism AC, a todas las subredes que se encuentra dentro de la vereda Bosachoque (Mejia 2018).

## 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 (Bhaskaran Raman 2007), sin embargo, existen unas comunidades con poco o ningún acceso a las TIC (Rendon Gallon, Patricia Jeanneth Ludeña González, and Fernandez 2011) 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 acceso con condiciones climatológicas desfavorables e incluso 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 (Bernardi 2012).

La ilustración 1 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 la Información y las Comunicaciones debido a la falta de infraestructura, difícil acceso a zonas apartadas de centros poblados y su nivel de alfabetización digital.

### 2.2.2 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

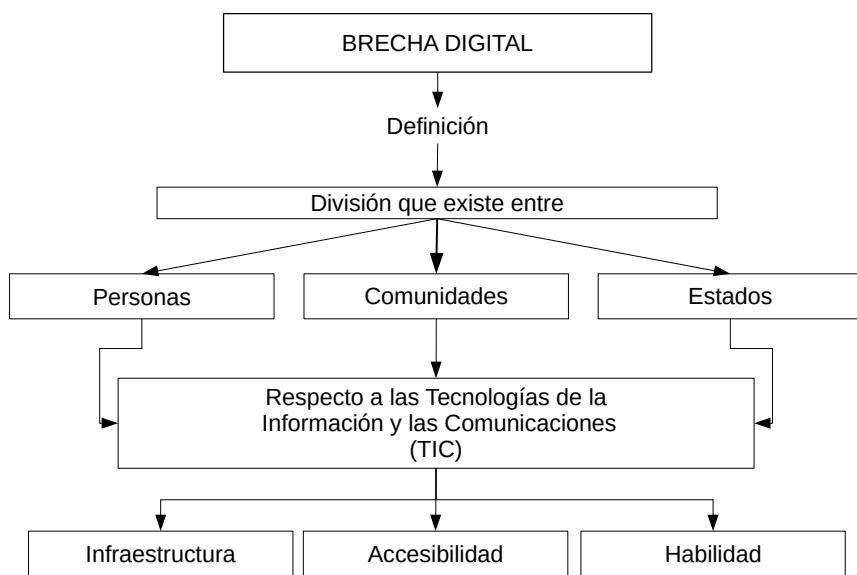


Figura 1: Brecha Digital

redes comunitarias implementadas en poblaciones vulnerables donde el acceso a la información es una posibilidad y no una realidad (Gordillo 2013).

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.

#### **2.2.2.1 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 como 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 (guifi.net 2016).

#### **2.2.2.2 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 trasmitir datos de cualquier tipo por cualquier participante, incluyendo también fines comerciales(guifi.net (2016)).

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 (WCN) en donde ya se han realizado trabajos importantes como se muestra en (Flickenger 2013).

### **2.2.3 Planeación de Redes Inalámbricas**

Una red inalámbrica es 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 (IBM 2019), 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.

#### **2.2.3.1 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.

### **2.2.4 Algoritmos utilizados en la planeación**

Aunque existen estructuras de algoritmos para solucionar problemáticas en la planeación incremental de redes inalámbricas (Whitaker 2003) 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, *Whitaker* 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, 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 (Abido (2002)). Este algoritmo permite encontrar una ubicación de las torres en la fase de planeación para lograr un óptimo rendimiento de la red.

## **2.2.5 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 la 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 (Ríos Rivera 2015)

### 2.2.5.1 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  $G = (V, A)$ , donde:

- $V$  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 de  $V$ .

#### 2.2.5.1.1 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 sinfín 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. (NetworkX 2019).

## 2.3 ESTADO DEL ARTE

### 2.3.1 Planeación de redes móviles UMTS

En (St-Hilaire 2008), 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*”).

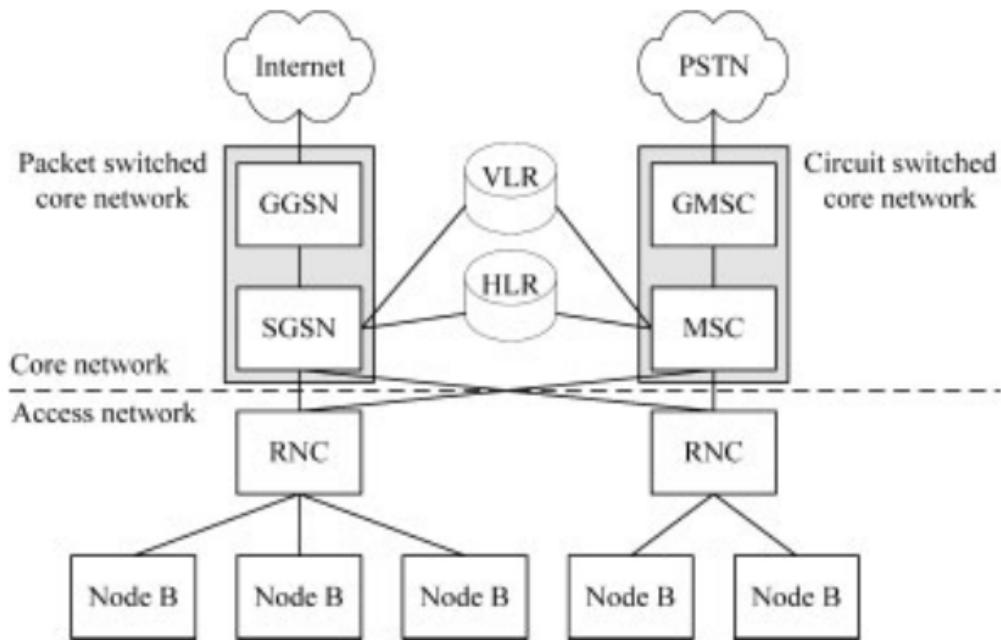


Figura 2: Estructura básica de una infraestructura UMTS. Tomado de St-Hilaire (2008)

Las estaciones bases (en este caso son los *nodos B*) son usados para trasmisir/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.

### **2.3.1.1 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.

#### **2.3.1.1.1 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 (Amaldi 2003), 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 trasmitida y las atenuaciones de señal en la propagación, por ende la potencia trasmitida 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 (Raisanen 2005), 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**, **NSGAII**, **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 parente 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.

### 2.3.2 Redes WiMAX

En la planeación de celda, se han realizado trabajos con la tecnología 802.16e o WiMax; el autor (Gordejuela-Sánchez and Juttner (2009)), 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 lo son penalizada con diferentes parámetros de requerimientos que debe tener la red como son 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 de 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 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 a 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.

### 2.3.3 Redes BWA en zonas Rurales

Prestar servicios de banda ancha en zonas rurales requiere de sistemas de planeación dado que el acceso a estas zonas apartadas requiere inversión en infraestructura para desplegar la topología física de la red. Además, el desarrollo de las telecomunicaciones de banda ancha en zonas rurales se enfrenta a numerosos desafíos dentro del ecosistema de las telecomunicaciones de banda ancha, entre ellos se encuentran:

- Los gobiernos: Perspectiva política, jurídica y reglamentaria
- Los reguladores: Políticas para el despliegue de infraestructura en zonas distantes
- Los proveedores de servicios de telecomunicaciones: La inversión en telecomunicaciones rurales debe garantizar un negocio sostenible y viable
- Los fabricantes de equipos de cliente (CPE): Costo de los equipos
- Los consumidores: Costo elevado de los servicios, dificultad de acceso y disponibilidad, menor nivel de alfabetización tecnológica lo que imposibilita usar los servicios disponibles.

En la planeación de redes inalámbricas en áreas rurales, destacan los autores (Sen, Bernardi, Rios), 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.

Con el objetivo de reducir la brecha digital, autores (Bernardi 2012),(Rendon Gallon, Patricia Jeanneth Ludeña González, and Fernandez 2011),(Bhaskaran

Raman 2007) han propuesto como solución la planeación y despliegue de redes de banda ancha inalámbrica en zonas rurales; considerando las condiciones locales, como la ubicación geográfica, el bienestar económico de la comunidad, el tipo de entorno rural o urbano y el relieve del terreno, puede identificarse un conjunto de posibles soluciones para prestar accesos de banda ancha, y que van, entre otros, desde sistemas de cable a sistemas inalámbricos fijos, sistemas satelitales o de enlaces de microondas, sistemas ADSL y tecnologías móviles. A su vez, se destacan algunos trabajos de planeación de redes BWA, los cuales se desarrollan en países con marcadas diferencias de índices de desarrollo humano y el porcentaje de población que vive en áreas rurales; se habla entonces de Reino Unido, un país desarrollado donde el 17% de la población vive en área rurales y la India, un país en vía de desarrollo, donde el 66% de la población vive en áreas rurales.

### **2.3.3.1 Redes BWA en la India**

#### **Ubicación de la red:**

El autor *Sen* se enfoca específicamente en la planeación de redes de banda ancha en áreas rurales, en su tesis (Bhaskaran Raman 2007) trabaja sobre una red desplegada en el distrito de Andhra del Oeste de Godavari Pradesh ubicado en la India.

#### **Población a quién va dirigido:**

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.

#### **Problemática:**

El problema radica en el hecho de que las zonas rurales 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.

#### **Causas:**

- Costo elevado de la expansión de la red telefónica fija

- No es un modelo de negocio debido al bajo retorno de la inversión
- Baja densidad de usuarios
- Costo de infraestructura

### **Solución:**

Por consiguiente, el autor propone la planeación de la topología de una red inalámbrica con el uso de la tecnología 802.11, puesto que permite una buena solución teniendo en cuenta su gran aceptabilidad, principalmente por su bajo costo. Por ende, esta tecnología se ha presentado como una opción de económica y efectiva para cubrir largas distancias, ya que permite que zonas muy amplias puedan conectarse a un nodo de línea terrestre con conectividad a Internet de forma cableada (como fibra óptica) por medio de enlaces inalámbricos. Cada enlace inalámbrico corresponde a una antena en una torre instalada en cada pueblo, los cuales deben tener línea de vista *L.O.S.* (*Line Of Sight*).

Para la formulación en la construcción de una topología que permita el desempeño de la red, se estipulan de tres principales restricciones:

1. Restricción de rendimiento: Capacidad de carga y descarga por cada nodo o pueblo que en el caso de la red en que se realizó el trabajo, se establecido que en cada nodo se tuviera un ancho de banda mínimo de 384 Kps .
2. Restricción de Potencia: Se refiere al límite superior de la Potencia Isotrópica Irradiado (PIRE) en cada transmisor y el límite inferior de potencia recibida en el receptor (sensibilidad del receptor).
3. Restricción de interferencia: La señal recibida debe ser mayor al umbral de interferencia.

El problema de la planeación es resuelto teniendo en cuenta una serie de dependencias, los cuales están mostradas en la *figura 2*. 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 datos más elevada.

- 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 trasmisión 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 el cual es la relación de densidad de energía que radia en una dirección específica.

- La MAC depende de la potencia de trasmisión

Esto es específicamente para el protocolo MAC 2P, en el que múltiples enlaces pueden operar simultáneamente. La operación simultánea de múltiples enlaces requiere 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.

#### **2.3.3.1.1 Consideraciones de diseño y enfoque de solución**

Una vez se ha visto como se divide el problema, el autor sugiere resolver las dependencias con los siguientes pasos, el cual van a ser explicados:

- **Topología de Búsqueda (TS):**

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 altura (HA):**

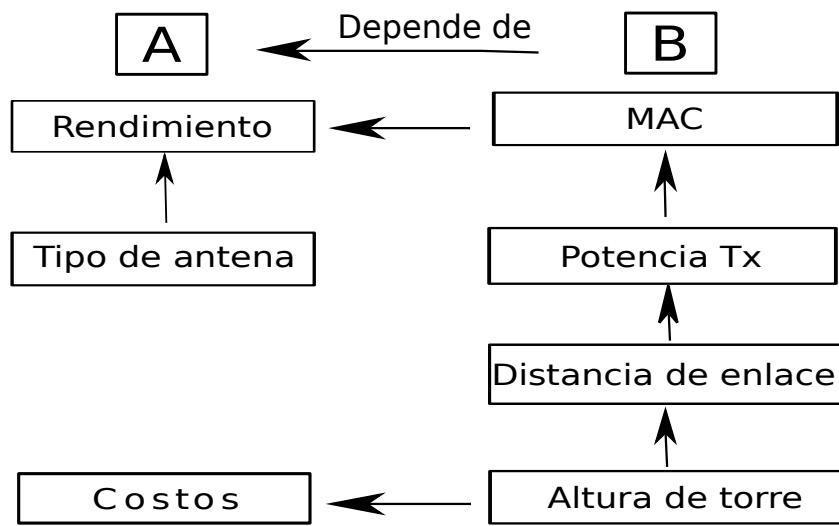


Figura 3: Dependencias de requerimientos

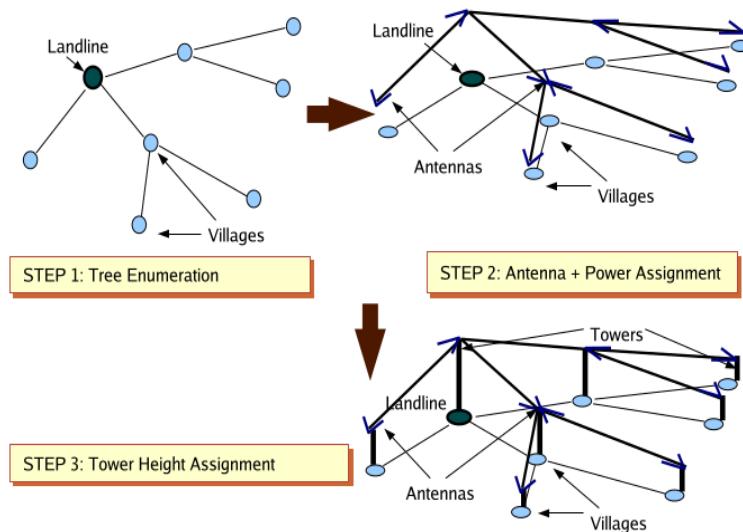


Figura 4: Secuencia de pasos solución del problema de planeación en la india

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 optima.

- **Asignación de Antena (AA):**

Asignación apropiada de las antenas y sus respectivas orientaciones, se desarrolla un algoritmo heurístico de tiempo complejo polinómico.

- **Asignación de Potencias (PA):**

Proporcionar las potencias de transmisión en los radios del sistema usando LP.

**Aporte final:**

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 respectos a una planeación sin ninguna técnica de optimización.

### 2.3.3.2 Redes BWA en Escocia

**Ubicación de la red:**

Bernardi 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 el continente británico hasta la península de Sleat en la isla de Skye.

**Población a quién va dirigido:**

Gran Bretaña es un país desarrollado, comúnmente llamado “país del primer mundo” ya que su población en su mayoría vive en zonas urbanas, 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).

**Problemática:**

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.

**Causas:**

- Costo de despliegue de ADSL

- Bajo retorno de la inversión
- Los usuarios viven lejos unos de otros
- Costo de los equipos
- No se puede acceder a software para comunicar pequeñas comunidades y pequeños WISP

Según *Bernardi*, en las últimas décadas se ha incrementado la conectividad de banda ancha, siendo la ADSL (del inglés Asymmetric digital subscriber line) con más del 60% de las conexiones de banda ancha en países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos es un organismo de cooperación internacional (OCDE); esto se debe principalmente al éxito de la capitalización de ADSL debido al éxito de la red de telefonía. Esta tecnología se caracteriza por que la tasa de trasmisión máxima que puede alcanzar esta en función de la distancia entre el usuario y la central telefónica, es decir, entre más larga sea la distancia, la velocidad de trasmisión es más lenta, por esta razón es comúnmente más utilizada en áreas metropolitanas debido a que tiene más suscriptores y sea 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.

Pero *Bernardi* expone el despliegue de una red Rural de Banda Ancha (BWA) argumentando que la planeación ad-hoc no es una alternativa de diseño eficiente para este tipo de redes, sin embargo, refiere que la industria ofrece software para planeamiento de redes inalámbricas pero estos no están disponibles ni son adecuados para comunicar pequeñas comunidades y pequeños proveedores de servicio de Internet inalámbrico (WISP) ; cabe resaltar que las BWA usan un modelo de dos niveles, consistiendo en radioenlace Punto Multipunto (PMP) y Punto a Punto (PTP), el primero enlazando la Antena de la torre a los diferentes clientes y el segundo correspondiente al Backhaul.

### **Solución :**

El Internet satelital se podría decir que es una alternativa de conexión, puesto que está disponible prácticamente en cualquier parte y es frecuentemente subsidiada en áreas remotas incomunicadas, sin embargo, también tiene latencia de tiempo de ida y vuelta muy altos, lo cual lo hace inadecuado para aplicaciones que consuman un ancho de banda considerable, como es el caso de una videollamada (skape).

A través del planeamiento de red incremental *Bernardi* desarrolla un software denominado IncrEase cuyo enfoque es identificar la estrategia de despliegue más económica para planear la red teniendo en cuenta que los CPE (customer Premises Equipment) son la opción más rentable para llegar a la población en zonas rurales.

Los proveedores de servicio de Internet inalámbrico implementan una metodo-

logía de diseño para operar en escenarios rurales obteniendo remuneración de su inversión, este consiste en planificar su crecimiento ampliando su cobertura, tomando variables como:

- Limitar el alcance geográfico de los WISP: Para reducir los costos de operación.
- Infraestructura de la red: En áreas rurales la fibra para el Backhaul no está disponible, por ello los WISP deben desplegar su propio Backhaul inalámbrico, aumentando los costos.
- Cobertura de la red: El despliegue rural está basado en la cobertura más no en la capacidad.
- Presupuesto ajustado: Los proveedores de Internet buscan obtener un retorno de su inversión desde su etapa de despliegue ya que las zonas rurales son entornos de baja rentabilidad.
- Clientes agrupados: Proporcionar acceso a la red en sectores dónde haya más densidad de la población, para así captar más usuarios.

*Bernardi* desarrolla un paquete de software con especial énfasis en las regiones rurales y en desarrollo. Se resalta que abordó tres desafíos técnicos en el contexto de redes de acceso inalámbrico de banda ancha:

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

#### **Aporte:**

La contribución de *Bernardi* es potenciar el negocio de los pequeños proveedores de Internet inalámbrico (WISP) en zonas rurales a través de un sistema de software, haciéndolo más eficiente reduciendo la brecha digital, a través de la herramienta IncrEase.

Se desarrolla un software de código abierto IncrEase implementado como una aplicación de escritorio multiplataforma en Java. IncrEase esta basado en un GIS de software libre de la NASA World Wind Java y en una base de datos gráfica Neo4J.

Para la implementación de IncrEase se toman tres fuentes:

- Demanda de la cobertura: Posibles usuarios de zonas rurales que no tienen acceso al servicio
- Usuarios que fallaron en la etapa de instalación: Cobertura insuficiente
- Reporte mesas de ayuda: Localización de los usuarios existentes

Además se obtienen otros datos de factores influyentes como la disponibilidad

DSL, la cobertura de red 3G y datos demográficos. IncrEase a través de datos en forma de arreglo bidimensional cubre regiones de interés y con ello obtiene mapas de calor (áreas de mayor beneficio por la actualización de la red). En estos mapas a mayor calor menor es la cobertura, una posible solución es la instalación de una torre a partir de una lista de torres disponibles en esa área.

- **Modo de operación herramienta IncrEase**

Flujo de información de la herramienta

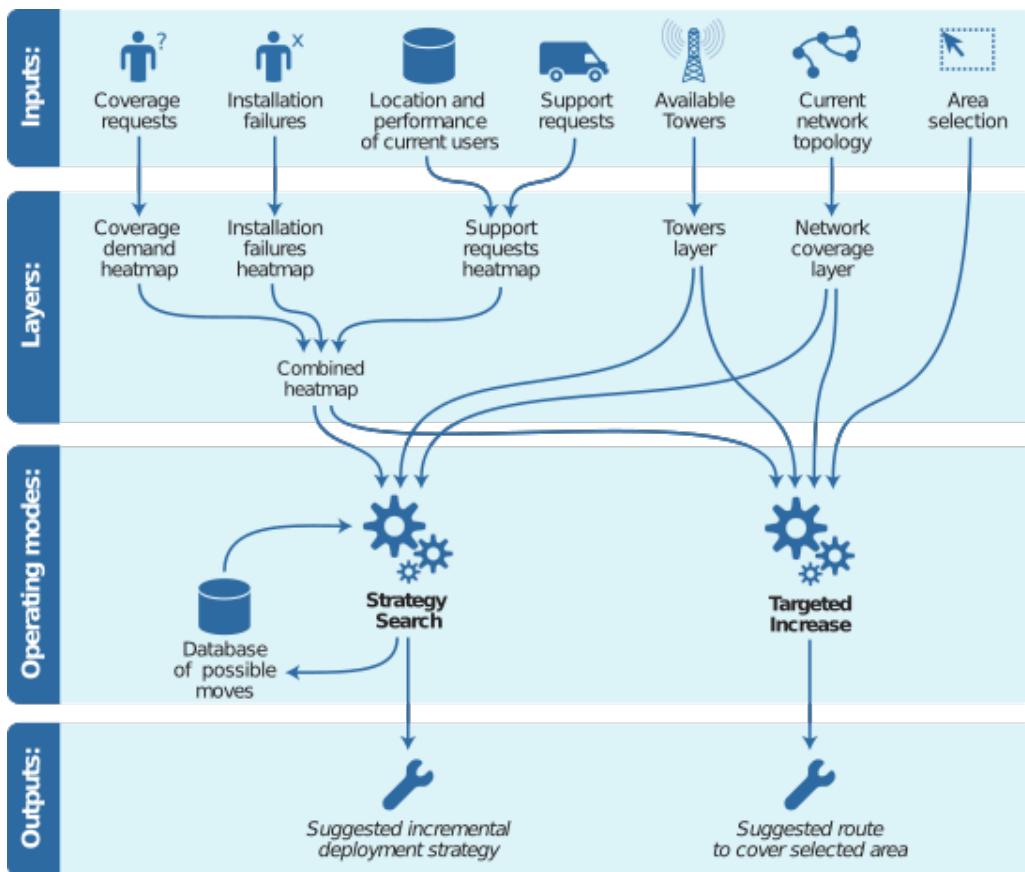


Figura 5: Ejemplo de flujo de información en la herramienta IncrEase

- IncrEase Targeted: En este modo de operación el operador selecciona una región específica de cobertura, como parte de expansión de la red
- Búsqueda Estratégica: Dónde 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

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

### **Ubicación de la red:**

A nivel local, (Ríos Rivera 2015) 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.

### **Población a quién va dirigido:**

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.

### **Problemática:**

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

### **Causas:**

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

### **Solución:**

En el informe técnico “Realización del estudio de factibilidad, Socialización y Capacitación, para Implementación de Infraestructuras de Voz Ip y Comisiones Convergentes en la Región del Sumapaz” 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.

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 enfasis 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:

#### **2.3.3.3.1 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 varia la altura de los obstáculos.

#### **2.3.3.3.2 Costo de las torres**

Para lograr obtener linea 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 esta re-lacionado con material de construcción, por ejemplo para un enlace de entre 7-8 Km (distancias típicas) se necesitarfan torres de entre 30 m y 45 m con costos de entre 25 y 38 millones de pesos colombianos. Este costo es de varios ordenes 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.

**Aporte:**

Para resolver el problema de la planeación el autor desarrolla un algoritmo basado en (Debmalya Panigrahi 2008), dónde la solución resulta de dos algoritmos TC-ALGO( $G,c$ ) y START-TC-ALGO( $G,c$ ), 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 beneficio

### **3 Capítulo 3. Diseño metodológico**

#### **3.1 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**

En esta fase se indaga sobre las herramientas de planeación de redes inalámbricas existentes con el propósito de recopilar información para analizar y seleccionar la que más se adapte a la planeación de redes inalámbricas de banda ancha en zonas rurales, en esta primera etapa se realizan las siguientes actividades:

### **3.1.1 Recolectar información de planeación incremental de redes inalámbricas**

Este recurso se utiliza para registrar información relacionada con la planeación de redes inalámbricas, se usó la técnica de recopilación documental consultando libros, artículos de investigación en su mayoría de la revista de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), tesis, informes y demás documentos que contribuyeran a proporcionar datos enfocados en la temática central del proyecto. Lo que permitió obtener un bajo costo considerando la gran cantidad de información que se obtuvo, la bibliografía consultada es de característica técnica lo que permitió lograr una dimensión histórica, social y tecnológica a través del tiempo.

### **3.1.2 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:

Cuadro 1: Ficha bibliográfica para seleccionar los archivos de estudio.

---

Tipo de documento
Título
Año
URI
Temática central
Estado del arte y marco conceptual reseñado
Metodología
Resultados

---

De este análisis de fuentes se encuentra que quince (15) son artículos de investigación, cinco (5) son tesis y dos (2) son libros. De los cuales 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.

### **3.1.3 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 Milton* 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

### **3.1.4 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* desarrollo 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
- *Rios* por su parte, aplica el algoritmo de (Panigrahi) 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.

### **3.2 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.

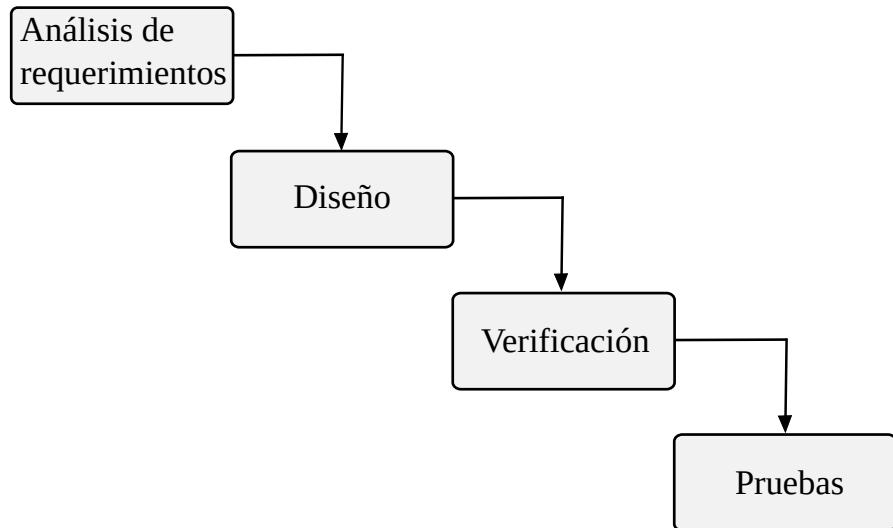


Figura 6: Estructura metodología cascada

#### **3.2.1 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 (Bhaskaran Raman 2007), [panagrahi2008] y (Ríos Rivera 2015), 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.

#### Asignación de altura de torres

*Sen* propone una heurística que sigue una secuencia de pasos explicados anteriormente y entre estos resuelve el problema de encontrar una solución de alturas optimas utilizando programación lineal (PL), sin embargo, en (Debmalya Panigrahi 2008) se propone un algoritmo para asignar la altura donde cita a (Bhaskaran Raman 2007), puesto que sigue el mismo enfoque de reducir el coste de infraestructura de red en zonas rurales, sin embargo, el autor *Panigrahi* proponen los algoritmos TC-ALGO Y START-TC-ALGO que mejora 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 optima 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.

En (Ríos Rivera 2015) se propone el diseño de una topología de infraestructura de red inalámbrica en la Región del Sumapaz implementando los algoritmos planteados en (Debmalya Panigrahi 2008), 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 (Bernardi 2012), 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 determinado los algoritmos que resuelven los requerimientos, se detallan los parámetros de entrada y salida de cada uno de los algoritmos propuestos por los autores.

### **3.2.1.1 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***

Cuadro 2: Datos de entrada del algoritmo planteado por *Sen*.

---

#### Datos de entrada

---

Enumeración de todos los árboles y para cada árbol (coordenadas de la ubicación de las villas)

Asignación de las antenas

Asignación de los valores de potencia de las antenas

Asignación de las alturas de las torres en todos los nodos

---

Cuadro 3: Datos de salida del algoritmo propuesto por *Sen*.

---

#### Datos de Salida

---

Topología de la red

Costo del árbol generado en comparación con otro anteriormente generado, de lo dos se guarda el de menor costo

---

- **Algoritmo diseñado por Bernardi**

Cuadro 4: Parámetros de entrada del algoritmo de Bernardi.

Datos de entrada
Demandas de cobertura
Instalaciones fallidas
Ubicación y desempeño de los usuarios actuales
Solicitud de soporte
Torres disponibles
Topología de red actual
Área de selección

Cuadro 5: Datos de Salida del algoritmo de bernardi.

Datos de salida
Estrategia incremental de despliegue sugerido
Ruta sugerida para cubrir el área seleccionada

Cabe resaltar que este paquete de software proporciona dos modos de operación que se han mencionado con anterioridad:

- Búsqueda estratégica: Cuya salida es la primer fila de la tabla anterior
- Targeted Increase: donde se sugiere una ruta al área seleccionada

s

- **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).

Cuadro 6: Parametros de entrada y salida del primer algoritmo de la aplicación, TC-ALGO (G,c)

Datos de entrada TC-Algo(G,c)	Datos de Salida TC-ALGO(G,c)
Grafo G(V,E)	Función de alturas h
Función de costos	

Cuadro 7: Datos de entrada y salida del segundo algoritmo  
START-TC-ALGO (G,c).

Datos de entrada START-TC-ALGO (G,c)	Datos de salida START-TC-ALGO (G,c)
Grafo G(V,E)	relación costo beneficio $r'$ best
Función de alturas h	incremento de altura incr
Nodo n	
Incremento altura variación en v	

Ahora, con los tipos de 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 vistos con anterioridad, seleccionando las variables que contribuyen a resolver el problema a nivel local.

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

Cuadro 8: Parámetros de entrada algoritmo propuesto

Datos de entrada
Grafo topología de la red
Asignación de antenas
Función de costos
TC-ALGO
START-TC-ALGO
Limitar el alcance geográfico
Red Backhaul disponible
Solicitudes de Cobertura
Clientes agrupados

Cuadro 9: Salida del algoritmo

Datos de salida
Mejor topología de expansión de la red con el menor costo

### **3.2.2 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 del requerimiento	Entrada 1
Nombre del requerimiento	Cobertura
Características	Ubicación de la red existente
Descripción del requerimiento	Límite geográfico de la red actual
Requerimiento NO funcional	
Prioridad del requerimiento	Alta

Table:

Identificador del 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
Requerimiento NO funcional	
Prioridad del requerimiento	Alta

Table:

Identificador del 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
Requerimiento NO funcional	

Identificador del requerimiento	Entrada 3
Prioridad del requerimiento	Alta

Table:

Identificador del 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.
Requerimiento NO funcional	
Prioridad del requerimiento	Alta

Table:

Identificador del 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 donde se aplicará el algoritmo se analizarán las condiciones del terreno para la ubicación de las torres
Requerimiento NO funcional	
Prioridad del requerimiento	Alta

Table:

Identificador del requerimiento	Entrada 6
Nombre del requerimiento	Ingreso de los datos
Características	Datos de entrada del algoritmo

Identificador del requerimiento	Entrada 6
Descripción del requerimiento	Permite que los diseñadores del algoritmo ingresen las diferentes variables o datos para el funcionamiento del programa.
Requerimiento NO funcional	
Prioridad del requerimiento	Alta

Table:

Identificador del requerimiento	Entrada 7
Nombre del requerimiento	Operaciones matemáticas
Características	Procesos matemáticos para obtener una respuesta óptima
Descripción del requerimiento	PLas operaciones matemáticas permiten al algoritmo brindar una respuesta óptima sobre la ubicación de las torres en el lugar donde se expandirá la red, esto conlleva a realizar calculos para que su implementación sea de menor costo
Requerimiento NO funcional	
Prioridad del requerimiento	Alta

Table:

- **Requerimientos NO funcionales**

Identificador del requerimiento	INT01
Nombre del requerimiento	Rápidez del algoritmo
Características	Desempeño en la ejecución del algoritmo.
Descripción del requerimiento	Evaluar el desempeño en velocidad de respuesta del algoritmo a los datos de entrada ingresados por el diseñador
Requerimiento NO funcional	
Prioridad del requerimiento	Alta

Table:

Identificador del requerimiento	INT02
Nombre del requerimiento	Requerimientos de procesamiento
Características	Capacidad de la memoria del pc para procesar el algoritmo
Descripción del requerimiento	Determinar cuanto espacio y memoria necesita el equipo para procesar y ejecutar el algoritmo
Requerimiento NO funcional	
Prioridad del requerimiento	Alta

Table:

Identificador del requerimiento	INT03
Nombre del requerimiento	Lenguaje de programación
Características	Python
Descripción del requerimiento	El algoritmo se desarrollará en el lenguaje de programación Python
Requerimiento NO funcional	
Prioridad del requerimiento	Alta

Table:

### 3.2.3 Diseño

#### 3.2.3.1 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 Bosachoque 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.

Para proponer un nuevo algoritmo se establece:

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

En la siguiente figura se establece el diagrama sistémico del modo de operación de la herramienta propuesta.

### **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 donde todos los nodos se encuentren conectados entre sí.
- Limitar el alcance geográfico: Se delimita la región en donde 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**

##### **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.

Para realizar estos mapas se utiliza la herramienta QGIS, que es un cliente GIS de código abierto 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.

Se consideran dos fuentes de información, 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.

##### **IncrEase**

Para el caso regional de la Provincia del Sumapaz, se considera la planeación incremental de la red propuesta en (Bernardi 2012).

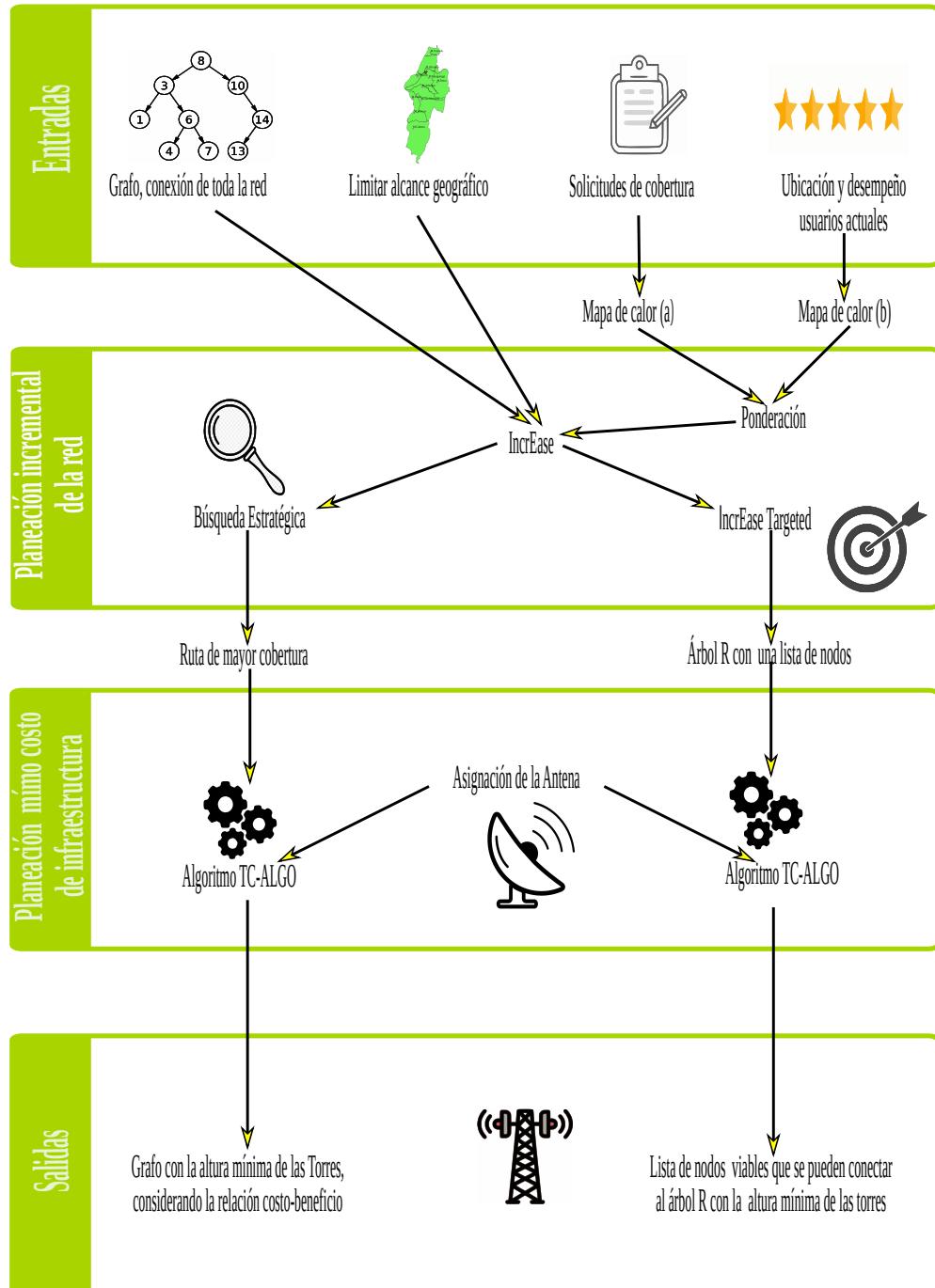


Figura 7: Diagrama sistémico

En la figura n, se presenta el flujo de información de la herramienta IncrEase. En la que un conjunto de archivos XML contienen información estadística de la red que es leída y analizada. Bernardi considera tres fuentes de información. La primera es la *demandas de cobertura*: La lista de solicitudes de cobertura recibidas (puede ser por ejemplo en la página del proveedor WISP), para posibles usuarios que están viviendo en áreas sin servicio.

El segundo es el conjunto de detalles sobre aquellos usuarios nuevos que *fallaron en la etapa de instalación* debido a una cobertura insuficiente. Finalmente, importa un registro de llamadas de reportes a mesas de ayuda a WISP y localización de los usuarios existentes. Algunos datos extras pueden ser importados capturando otros factores influyentes (disponibilidad de DSL, cobertura 3G, datos demográficos etc.). IncrEase elabora cada fuente de datos para formar un arreglo bidimensional cubriendo la región geográfica de interés, con cada valor de celda representando cuántos “ítems” (usuarios actuales) que hacen parte de la región de la celda. Los valores de celda son entonces normalizados como una fracción de la celda que tiene más ítems.

IncrEase presenta visualmente tres arreglos 2D en los mapas como mapas de calor, y los combina como un promedio ponderado donde las ponderaciones están configuradas de acuerdo a cada métrica a la importancia relativa del operador.

Estos mapas de calor combinados suministran una vista de las áreas que podrían beneficiarse más por la actualización de la red. En este caso el calor (celdas con altos valores en el arreglo 2D) es un indicador de cobertura inalámbrica inadecuada que puede ser quitada por una nueva torre de transmisión o un nuevo sector directivo. Los mapas de calor son almacenados en memoria y pueden acercarse, mostrarse u ocultarse seleccionando los elementos gráficos apropiados. IncrEase puede importar una lista adicional de torres disponibles para ser instaladas. Este inventario podría incluir torres que ya existan disponibles (por ejemplo para arrendar de otro operador), o posibles lugares donde se puedan construir nuevas torres. Una descripción XML de la topología del lugar, incluyendo la ubicación y la altura de cada torre y la configuración y el número de antenas del sector también se pueden importar a IncrEase. Tal información es usada para generar una capa de “cobertura de red” con una granularidad configurable, el cálculo de línea de vista de cada torre existente y considerando el azimut e inclinación de los sectores existentes y un parámetro de máxima distancia que especifica el rango admisible para enlaces inalámbricos en el nivel de acceso.

Esta herramienta proporciona dos modos de operación

Notaciones:

- $T$ : 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  $T$
- IncrEase targeted

Los mapas de calor son una ayuda visual para el operador de red, ya que puede ver las áreas que más se pueden beneficiar, debido a una mejora en la cobertura del modo de operación **IncrEase** suministra el nivel más liviano de automatización disponible en **IncrEase**, dejando “el humano en el bucle” preguntándole al operador que visualmente seleccione en el mapa la visión geográfica donde la cobertura se debería mejorar. **IncrEase** entonces automáticamente identifica cuál es la celda más caliente en la región, definida como la que tiene mayor valor en la capa de calor combinada. La Aplicación determina el conjunto de torres más cercanas por ejemplo (20 en la configuración por omisión) del conjunto  $T - N$  que están en línea de vista de la celda caliente para formar el conjunto de lugares candidatos que cubrirán el hotspot, considerando varias fuentes de torres, permite la selección de entre un gran número de posibles rutas de retorno, en comparación con enfocarse solo en la torre más cercana al punto de acceso (hotspot). El software encuentra la mejor manera de conectar cada una de esas torres a la topología de red existente (i.e., el conjunto  $N$ ) 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, evitamos cuidadosamente contabilizar varias veces el “calor” asociado con una celda que puede estar en línea de vista con diferentes torres, ya que sesgaría los resultados. Así que consideramos el valor de estas celdas solo una vez. Para pathfinding sobre el grafo  $G$ , **IncrEase** 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. Nuestra implementación tiene dos pequeños cambios con el algoritmo original *A\**. Primero, toma como entrada un conjunto de nodos de origen (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 gráfico  $G$ , los costos son asociados con los vértices (es decir, torres) en lugar de bordes, por los que consideramos el costo de un borde  $(i, j)$  para que sea el nodo de salida  $i$ .

$A^*$  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 nuestro caso necesitamos diseñar una estimación de la mejor  $C(t) - h(t)$  que se pueda lograr para el resto del camino desde una o mas torres dada, hasta las torres objetivo. Nosotros adoptamos  $(l/d) * C_{min}$  como heurística, donde:

- $l$ : es la distancia en línea recta entre la torre actual que se está analizando y cualquiera de las torres objetivo
- $d$  es la máxima distancia permitida para realizar un enlace punto a punto (ambos en km)
- $C_{min}$  es el valor mínimo de  $C(t) - h(t)$  de todas las torres

Finalmente, nosotros introducimos dos modificaciones a la función de costos presentada antes. Como  $A^*$  requiere costos de bordes no-negativos, sumamos 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 permitimos dos coeficientes variables  $C_o$  y  $h_o$  y definimos el costo como  $C_o * C(t) - h_o * h(t)$ .

El resultado de la búsqueda de la mejor ruta se presenta como una ruta en el mapa junto con una indicación de texto de las torres que se desplegarán y su orden, como se muestra en la Figura.

- Busqueda estratégica

Mientras que **IncrEase Targeted** es un modo semi automático que requiere que el operador selecciones una región, el modo operacional de *búsqueda estratégica* identifica y sugiere la mejor estrategia de expansión de la red. Asumimos 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 ánimo de la búsqueda estratégica es entonces sugerir la mejor acción que el WISP pudiera tomar durante el siguiente intervalo de tiempo. Una limitación práctica obvia 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 algoritmo de búsqueda estratégica, que se lanza a través del botón “recalcular estrategias” en la interfaz de usuario de

IncrEase.

- **Paso 1** Un algoritmo de búsqueda de menor costo de múltiples fuentes 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  $T - N$  (las 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  $R$ , IncreEase añade un nodo “raíz” ficticia de cero costo conectada a cada torre en  $N$  y ejecuta un algoritmo de Dijkstra de la raíz a cada nodo en el grafo  $G$ . Un ejemplo se suministra en la figura donde (a) muestra el grafo de inter visibilidad  $G$  con nodos sombreados siendo aquellos que ya están instalados y (b) los caminos  $R$  resultantes luego de la ejecución del algoritmo de Dijkstra.
- **Paso 2** El grafo  $R$  se atravieza iniciando desde la raíz y en el transcurso la torres se etiquetan con el marcador

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

donde  $distancia(r)$  es la cuenta de las torres nuevas que se tiene que atravesar para alcanzar  $r$  a apartir 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 puden tener que ser instaldas primero para servir como *back-hauling relays*. Para medir los beneficios de cubrimientos futuros para hoy tomamos el concepto financiero de valor presente neto (NPV) que aplica una rata de descuento constante  $C$  (por ejemplo 5% 0.05) a las ganancias que ocurrirán en el futuro.

Un ejemplo se muestra en la figura . 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 picamos entre  $a$  y  $b$  basados en el beneficio total que ellos y sus descendientes podrían producir , podríamos decidir instalar la torre  $a$  como se muestra en la figura 4.4(b). Sin embargo si incrementamos el valor de  $C$  al 5%  $b$  se vuelve más atractivo como se ve en la figura4.4(c). El NPV controla cuán lejos es posible ir para instalar torres que dejen ganancia, permitiendo al propietario de la red afinar la duración del retardo del beneficio.

- **Paso 3.**  $R$  se atravieza una vez más esta vez desde las hojas hasta la

raíz. Mientras se hace esto, actualizamos 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 4.4(b) y 4.4(c).

Finalmente en cada clic en el botón de “próximo movimiento sugerido” **IncrEasepregunta** el número de movimientos (torres a ser instaladas). Entonces genera una lista ordenada  $L$  figura (c) que incluye la torres que se deberían instalar inmediatamente ordenadas según su puntaje de beneficio, calculado en el paso 3, posteriormente extrae el nodo superior de  $L$  y finalmente lo presenta en el mapa de los resultados.

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.

### 3. Planeación mínimo costo de infraestructura

#### Algoritmo TC-AIGO

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  $C(n)$ .

#### Asignación del tipo de antena

En el trabajo (Bhaskaran Raman 2007), 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  $8^\circ$  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  $30^\circ$  o  $22^\circ$  que pueda cubrir más puntos.

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

- Heuristica de planeación de antena

El autor *Sen* propone una heurística que vamos a implementar la cual está dada en un tiempo complejo de  $(n^2)$ , 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.

### **Asignación de altura de las torres**

Los autores (Bhaskaran Raman 2007), (Debmalya Panigrahi 2008) y (Ríos Rivera 2015), 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.

*Sen* propone una heurística que sigue una secuencia de pasos explicados anteriormente y entre estos resuelve el problema de encontrar una solución de alturas optimas utilizando programación lineal (PL), sin embargo, en (Debmalya Panigrahi 2008) se propone un algoritmo para asignar la altura donde cita a (Bhaskaran Raman 2007), puesto que sigue el mismo enfoque de reducir el coste de infraestructura de red en zonas rurales, sin embargo, el autor *Panigrahi* proponen los algoritmos TC-ALGO Y START-TC-ALGO que mejora la heurística que propone *Sen*.

A continuación de describe las ventajas que tienen los algoritmos de *Panagraghi* 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 optima 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.

En (Ríos Rivera 2015) se propone el diseño de una topología de infraestructura de red inalámbrica en la Región del Sumapaz implementando los algoritmos planteados en (Debmalya Panigrahi 2008), 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.

#### 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.

##### 3.2.3.2 Codificación del algoritmo

Para codificar IncrEase el algoritmo 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` y `searchIncrease`, los cuales representan cada uno de los modos de operación del software IncrEase propuesto en (Bernardi 2012). A continuación, se detalla la codificación de cada una de las funciones:

### 3.2.3.2.1 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. ““

```
def targetIncrease(G,listSource,listTarget):
    """Retorna una lista de nodos en un camino de uno
    o más nodos origen a uno o más nodos objetivo,
    con el valor mínimo de la suma de los valores de costo-
    calor.

Parámetros
-----
G : NetworkX graph
    Grafo con los atributos posición,
    costo y calor de cada uno de los nodos.
listSource :lista
    lista con los nodos origen.
listTarget :lista
    lista con los nodos objetivo.
Retorna
A : lista
    lista de nodos.
"""
miniContPath= 9999
for i  in listSource:
    for j in listTarget:
        answer=astar_path(G,i,j,heuristica,listNodeTarget= listTarget)
        cont = 0
        for k in answer:
            cont = cont + (G.node[k] ['costo'] - G.node[k] ['calor'])
        if cont < miniContPath:
            miniContPath = cont
            A= answer
return A
```

```

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

```
def astar_path(G, source, target, heuristic=None, listNodeTarget= None):
```

```
"""Retorna una lista de nodos en un camino de un nodo origen a un nodo objetivo
utilizando el algoritmo  $A^*$ .
```

Puede haber más de un camino corto, sin embargo, solo devuelve uno.

Parámetros

-----

G : NetworkX graph.  
source : node  
            Nodo inicial del camino.  
target : node  
            Nodo final del camino.  
heuristic : function  
            Es una función que estima el valor de cada nodo recorrido  
            con el valor de (costo - calor). En esta función toma de  
            argumento un nodo y devuelve un valor numérico.

Retorna

-----

A : lista  
    Lista de nodos.

Raises

-----

NetworkXNoPath  
    Si no existe un camino entre un origen y un objetivo.

"""

```
if G.is_multigraph():
    raise NetworkXError("astar_path() not implemented for Multi(Di)Graphs")

push = heappush
pop = heappop
#Almacena la cola prioritaria, nodo, costo de atravesarlo y parent.
#Usa la libreria heapq para mantener el orden de la prioridad.
#Adiciona un contador en la cola para evitar un monto subyacente
#intente comparar los nodos.
#prioriza y garantiza un unico para todos los nodos del grafo.
c = count()
queue = [(0, next(c), source, 0, None)]

#Asigna los nodos en cola a la distancia de las rutas descubiertas y
#las heurísticas calculadas al objetivo. Evitamos calcular la heurística
#más de una vez e insertar el nodo en la cola demasiadas veces.
enqueued = {}
# Asigna los nodos explorados al parent más cercano al origen.
explored = {}
```

```

minCosto=[]
while queue:
    # Pop del elemento mas pequeño de la cola queue.
    _, __, curnode, dist, parent = pop(queue)

    if curnode == target:
        path = [curnode]
        node = parent
        while node is not None:
            path.append(node)
            node = explored[node]
        path.reverse()
        return path
    if curnode in explored:
        continue
    explored[curnode] = parent
    maximaDist= maximaDistancia(G)
    for neighbor, w in G[curnode].items():
        if neighbor in explored:
            continue
        ncost = dist
        if neighbor in enqueueued:
            qcost, h = enqueueued[neighbor]
            # sí qcost < ncost
            #queda un camino más largo hacia el vecino en cola.
            #Eliminarlo necesitaría filtrar toda la cola, es mejor
            #dejarlo allí e ignorarlo cuando visitamos el nodo por segunda vez.
            if qcost <= ncost:
                continue
        else:
            #heurística
            #h = l / d * (Cmin)
            h = (distNodeTarget(curnode, listNodeTarget)*heuristic(neighbor))/maximaDist
            minCosto.append(h)
            enqueueued[neighbor] = ncost, h
            push(queue, (ncost + h, next(c), neighbor, ncost, curnode))
raise nx.NetworkXNoPath("Node %s not reachable from %s" % (source, target))
return minCosto
```

```

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

$l$  es la función `distMinNodeTarget(G, curnode, listNodeTarget)` que tie-

ne 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. ““

```
def distNodeTarget(nodo, listTarget):
```

```
    """Retorna mínima distancia entre el nodo y cualquiera
    de los nodos objetivo.
```

Parámetros

-----

nodo : node  
Nodo atravesado.

listTarget : list  
Lista de nodos objetivo.

Retorna

-----

maxDistancia : float  
Máxima distancia.

”””

```
miniDist = 999
for i in listTarget:
    dis = distancia(nodo, i )
    if dis < miniDist:
        miniDist = dis
return miniDist
```

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

”””

```
def maximaDistancia(G):
```

```
    """Retorna el valor de la maxima distancia de un enlace
    del grafo G.
```

Parámetros

-----

G : NetworkX graph  
Grafo con el atributo pos.

Retorna

```

-----
maxDistancia      :    float
                      Máxima distancia.

"""
pos = nx.get_node_attributes(G,'pos')
lisI=[]
lisF=[]
lista=[]
maxDistancia = 0
for i in pos.keys():
    for j in pos.keys():
        lat1=pos[i][0]
        lon1=pos[i][1]
        lisI.append(lat1)
        lisI.append(lon1)
        lat2=pos[j][0]
        lon2=pos[j][1]
        lisF.append(lat2)
        lisF.append(lon2)
        lista.append(lisI)
        lista.append(lisF)
#distancia calculada para coordenadas

distancia = m.cal_dis(lista)

if distancia > maxDistancia:
    maxDistancia = distancia
lisI=[]
lisF=[]
lista=[]
return maxDistancia
"""

```

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

```
"""Retorna un valor numerico con el valor del atributo costo - calor
de un nodo.
```

#### Parámetros

```
-----
```

```
nodo      :    node
```

```

nodos con atributo costo y calor.

Retorna
-----
valor numérico de costo - calor de nodo.

"""
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.

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

#### 3.3.1 verificación

#### 3.3.2 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  $Hmin(n)$  que representará un nodo origen que funcionará como *backhaul* y un nodo destino con el mayor valor de  $Hmax(n)$  que supondrá las zonas que se requieren más cobertura. Luego, se implementa la función `TC_ALGO` para generar un grafo  $Ghmin$  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 comparará 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 iteraciones y se ilustra en la siguiente imagen.

### 3.4 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 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, Cuchanal, Novillero y Viena. A su vez, Fusagasugá hace parte de los diez municipios que conforman la provincia del Sumapaz en el Departamento de Cundinamarca.

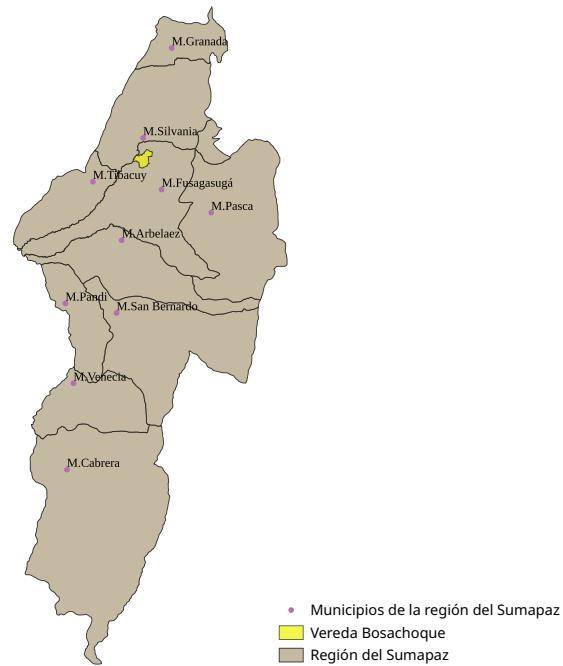


Figura 8: Ubicación

En la Figura 9 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.

- Solicitudes de cobertura:

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

Red Libre de Bosachoque:

De acuerdo con (Tobón) 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 Silvania (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.

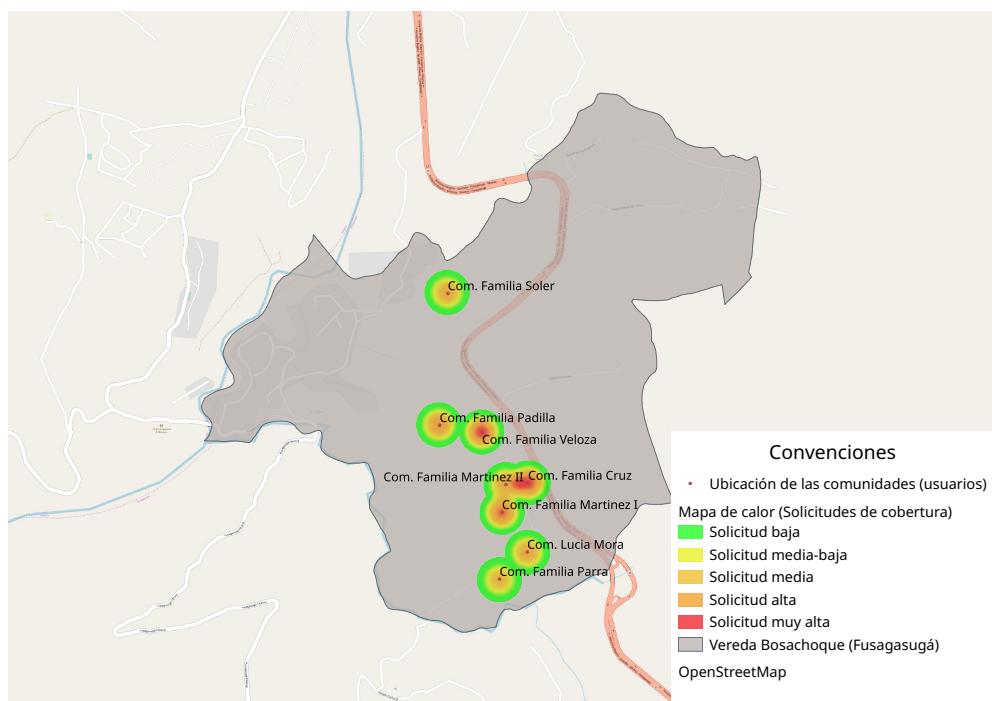


Figura 9: Mapa de calor, solicitud de cobertura Bosachoque

En la figura 9 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.

## Región del Sumapaz:

Se desea expandir la red libre de Bosachoque 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.

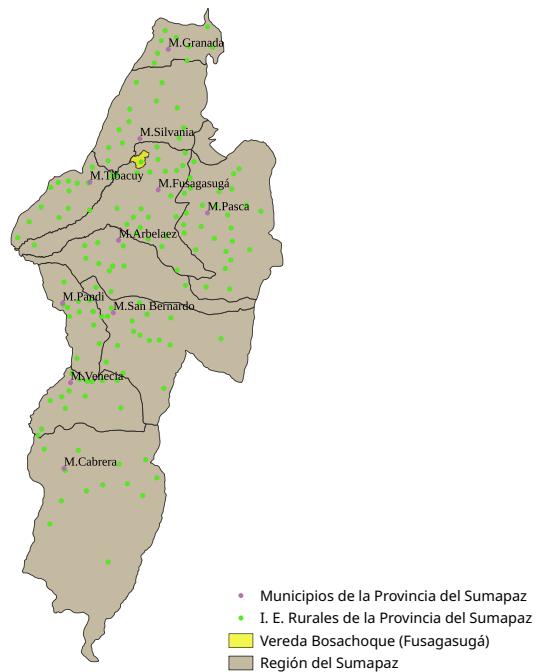


Figura 10: Ubicación de las Instituciones Educativas Rurales en el Sumapaz

En la figura n, 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 n.

En la figura n, 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.

- Ubicación y desempeño de los usuarios actuales:

Partiendo que la red actual se encuentra ubicada en la vereda Bosachoque, es allí dónde se genera el mapa de calor y así se determina el desempeño que han tenido los nodos instalados.

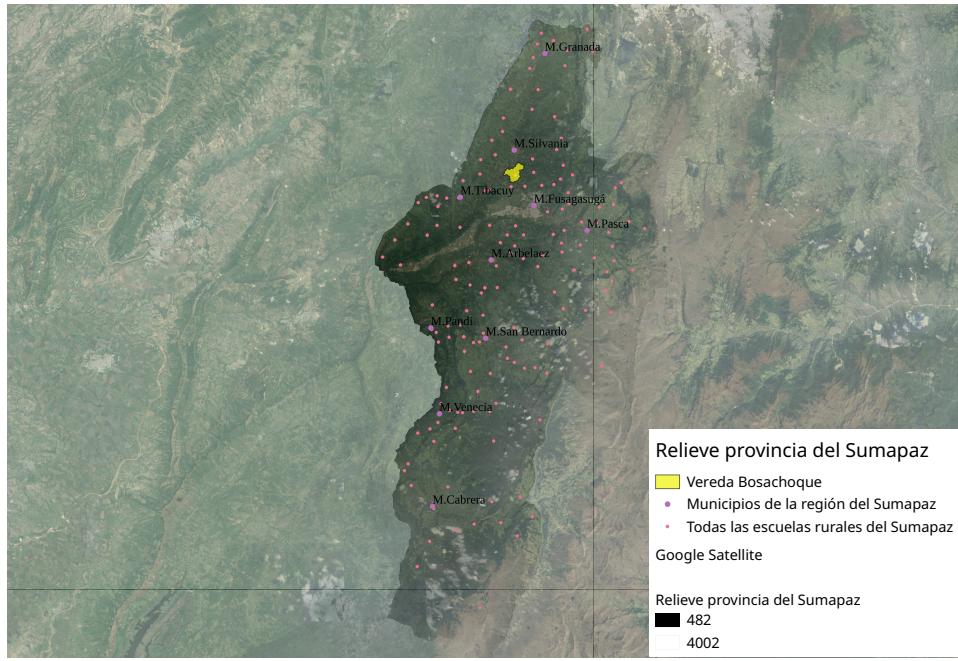


Figura 11: Relieve de la región del Sumapaz

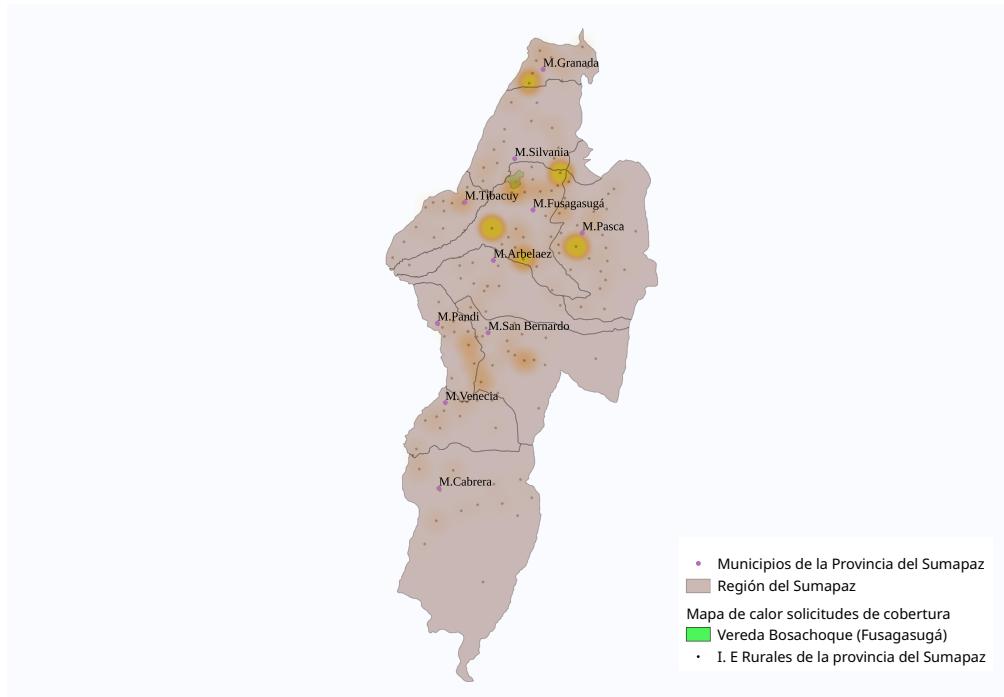


Figura 12: Mapa de calor solicitudes en la región del Sumapaz

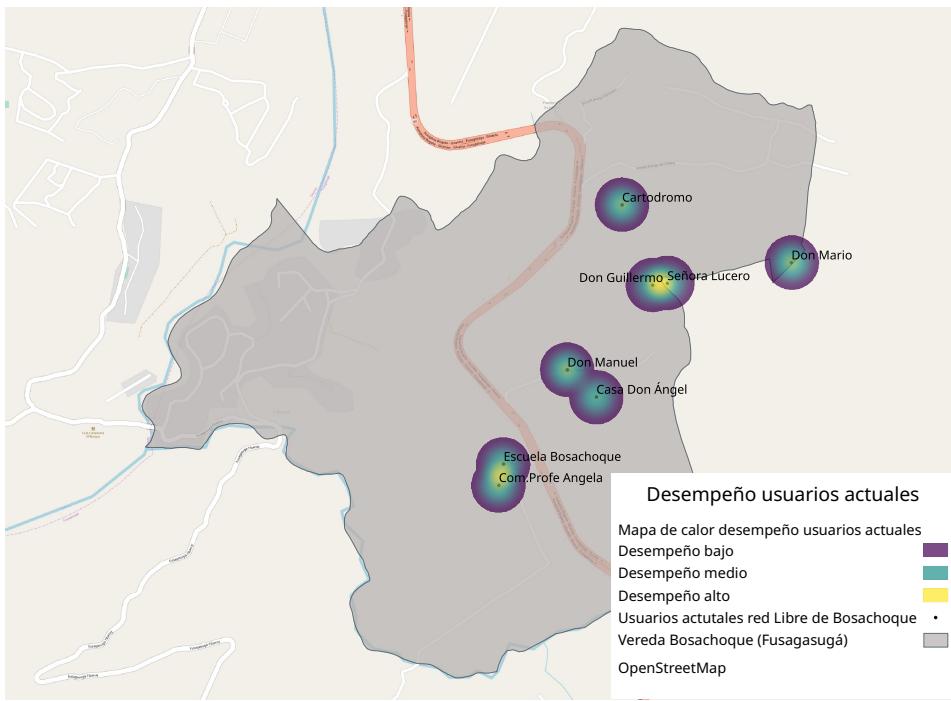


Figura 13: Mapa de calor desempeño y ubicación de los usuarios actuales

De acuerdo con la figura n, 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.

## 4 Capítulo 4. Análisis de resultados y discusión

## 5 Conclusiones y trabajos futuros

## Bibliografía

Abido, M.A. 2002. “Optimal Power Flow Using Tabu Search Algorithm.” *Electric Power Components and Systems*, 469–83.

- Amaldi, Capone, E. 2003. "Planning Umts Base Station Location: Optimization Models with Power Control and Algorithms." *IEEE Transactions on Wireless Communications* 2: 939–52.
- Antonio Capone y Matteo Cesana, Sandro Bosio ; 2007. "Radio Planning of Wireless Local Area Networks. IEEE/Acm Transactions on Networking." *IEEE/ACM Transactions on Networking* 15: 6:1414–1427.
- Bernardi, Giacomo. 2012. "Deployment and Operational Aspects of Rural Broadband Wireless Access Networks." PhD thesis, University of Edinburgh.
- Bhaskaran Raman, Sayandep Sen y. 2007. "Long Distance Wireless Mesh Network Planning: Problem Formulation and Solution." *ACM Int. Conference on World Wide Web (WWW)*, 893–902.
- Carlos A. Gómez y Octavio Salcedo P., Luis F. Pedraza ; 2012. "Implementación de Red Inalámbrica Comunitaria Para Ciudad Bolívar." *Visión Electrónica* 2: 11:46–47.
- Consejo Económico y Social, Organización Naciones Unidas : 2013. "El Acceso de Banda Ancha a Internet Como Medio de Lograr Una Sociedad Digital Inclusiva." *Comisión de Ciencia Y Tecnología Para El Desarrollo 16º Período de Sesiones*.
- Debmalya Panigrahi, S. Jaiswal, Partha Dutta. 2008. "Minimum Cost Topology Construction for Rural Wireless Mesh Networks." *IEEE INFOCOM 2008 - the 27th Conference on Computer Communications*, April, 9.
- Edwin Fernando Rojas y Laura Poveda, de la División de Desarrollo Productivo y Empresarial de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). 2017. "Estado de La Banda Ancha En América Latina Y El Caribe." *Publicación de Las Naciones Unidas*.
- Flickenger, Rob (Ed.). 2013. *REDES Inalmbricas En Los Paises En Desarrollo : Una Guia Practica Para Planificar Y Construir Infraestructuras de Telecomunicaciones de Bajo Costo*. Vol. 4. Hacker Friendly LLC. <http://wndw.net/>.
- Florez, Santiago. 2018. "Diseño E Implememtación de Un Sistema de Gestión Para La Red Inalámbrica Comunitaria Bosachoque Libre." *Universidad de Cundinamarca*.
- Gordejuela-Sanchez, F., and J. Juttner A. y Zhang. 2009. "A Multiobjective Optimization Framework for Ieee 802.16e Network Design and Performance Analysis." *Proc. Of IEEE Journal on Selected Areas in Communications*.
- Gordillo, Wilson. 2013. "Redes Libres- Enlaces Digitales Con Sentido Social." *ENGI. Revista Electrónica de La Facultad de Ingeniería, Universidad de Cundinamarca* 2: 2: 11–13.

guifi.net. 2016. “Guifi.net- El Proyecto Tecnológico.” December 2016. <https://guifi.net/es/proyecto-tecnologico>.

IBM. 2019. “Redes Y Planificación de Redes.” 2019. [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).

Mejia, Brian Alberto Achury. 2018. “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).” *Universidad de Cundinamarca*.

NetworkX. 2019. “Overview of Networkx.” April 2019. <https://networkx.github.io/documentation/stable/#>.

Programa de las Naciones unidas para el Desarrollo PNUD. 2018. “Índices E Indicadores de Desarrollo Humano.” Organización de las Naciones Unidas ONU. [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).

Raisanen, R. M., L. y Whitaker. 2005. “Comparison and Evaluation of Multiple Objective Genetic Algorithms for the Antenna Placement Problem.” *Mobile Networks and Applications* 10: 79–88.

Regulación de Telecomunicaciones, Comisión de. 2016. “Definición de Banda Ancha Para Colombia.” *Regulación de Infraestructura*.

Rendon Gallon, Álvaro, Patricia Jeanneth Ludeña González, and Andres Martinez Fernandez, eds. 2011. *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.

Ríos Rivera, Leonardo, Milton y Rodríguez Mújica. 2015. “Solución Al Problema de Construcción de La Topología En Redes Rurales Inalámbricas.” *IEEE Colombian Conference on Communication and Computing (IEEE COLCOM 2015)* I: 1–9.

Sara Bury ; Dimitrios Pezaros y Nicholas Race, Johnathan Ishmael ; 2008. “Deploying Rural Community Wireless Mesh Networks.” *IEEE Internet Computing* 12: 8:22–29.

St-Hilaire, Marc. 2008. “Topological Planning and Design of Umts Mobile Networks: A Survey.” *WIRELESS COMMUNICATIONS AND MOBILE COMPUTING* 9: 11.

Telecomunicaciones UIT, Unión Internacional de. 2012. *Impact of Broadband*

*on the Economy.* Regulatory & market environment.

Whitaker, S., R. y Hurley. 2003. "Evolution of Planning for Wireless Communication Systems." *Proc. Of Annual Hawaii Int. Conference on System Sciences*, 10.