

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL
PERÚ**

ESCUELA DE POSGRADO



Ampliación de la red de magnetómetros del proyecto Perú-
Magneto: Propuesta para su localización utilizando modelos de
optimización

Tesis para optar el grado de Magíster en Ingeniería Industrial con
mención en Gestión de Operaciones

Ing. Paulo Sergio Mamani Apolinario

Asesor:

Mg. Jonatan Edward Rojas Polo

Lima- Perú

2019

Resumen

Los fenómenos pre-sísmicos es un tema de investigación ampliamente abordado por la comunidad científica durante las últimas décadas. En el Perú las investigaciones en este tipo de fenómenos se encuentran a la vanguardia, a través del Proyecto Perú-Magneto desarrollado en el Instituto de Radioastronomía de la Pontificia Universidad Católica del Perú. En la actualidad el proyecto cuenta con una red de diez sensores, siendo la meta en el corto plazo la expansión de la red, instalando nuevos sensores que estarán ubicados a lo largo de toda la costa del Perú. Esto permitirá obtener una amplia base de datos, y analizar de forma continua y a tiempo real los fenómenos ocurridos en la costa. Esto representa un reto en cuanto las etapas de planeamiento, despliegue e instalación, mantenimiento, tratamiento y análisis de los datos.

Para afrontar este reto, en esta tesis se presenta un algoritmo que permita identificar las posibles zonas de instalación de los magnetómetros minimizando el costo fijo que representa la conexión a internet móvil de cada uno de estos sensores teniendo en cuenta restricciones como la influencia de ruido mecánico y eléctrico. Por otro lado, el algoritmo también será utilizado para plantear zonas de instalación que, esta vez escogidas por el criterio de un usuario, favorezcan la investigación científica al colocar los sensores que utiliza el proyecto a menor distancia unos de otros.

Finalmente, se hará una propuesta de planeamiento para el proyecto utilizando técnicas de Planeamiento Adaptativo, específicamente el Incrementalismo Articulado y se hará una evaluación económica de la expansión de la red de magnetómetros.

ÍNDICE GENERAL

Introducción	1
Capítulo 1: Marco Teórico	2
1.1 Investigación de Operaciones	2
1.2 Programación Lineal:.....	2
1.3 Programación Entera y Programación Entera Mixta:.....	4
1.3.1 Cobertura de Área:.....	4
1.3.2 Ubicación de instalaciones:.....	4
1.4 Programación no Lineal:.....	5
1.5 Redes de sensores:	6
1.5.1 Tipos de Redes de Sensores	6
1.5.2 Desafíos en las de Redes de Sensores	7
1.6 El Planeamiento Adaptativo	8
1.6.1 El Incrementalismo Articulado.....	9
1.7 Software GIS:.....	11
1.7.1 Optimización de una red de telefonía celular:	11
1.7.2 Modelo de localización – asignación para mejorar acceso centros de salud:.....	15
Capítulo 2: Situación Actual.....	17
2.1 El Proyecto Perú-Magneto	17
2.2 Consideraciones para la instalación de un magnetómetro	21
2.3 Objetivos.....	22
2.3.1 Objetivo General.....	22
2.3.2 Objetivos Específicos	22
Capítulo 3: Estudio del caso	23
3.1 Software a utilizar	23
3.2 Presentación del algoritmo.....	24
3.3 Etapa de preparación de Datos	26
3.3.1 Preparar Base de datos de Centros Poblados	26
3.3.2 Preparar datos de cobertura de internet móvil	32
3.3.3 Preparar fuentes de Ruido Mecánico y Eléctrico	34
3.4 Etapa de procesamiento de datos	36
3.4.1 Buffer de distancia	36
3.4.2 Selección de CCPP.....	38

3.4.2.1 Primera iteración	39
3.4.2.2 Segunda iteración	42
3.5 Resultados	42
3.5.1 Análisis de los resultados.....	47
3.5.2 Segunda ejecución del algoritmo.....	49
Capítulo 4: Propuesta de Planeamiento	54
4.1 División del Proyecto	54
4.1.1 Etapa de Financiamiento	54
4.1.2 Etapa de Exploración.....	54
4.1.3 Etapa de Instalación	55
4.1.4 Etapa de procesamiento de datos.....	55
4.2 Aplicación del Incrementalismo Articulado	55
Capítulo 5: Evaluación Económica del Proyecto	59
5.1 Evaluación de la primera propuesta de red	59
5.2 Evaluación de la segunda propuesta de red.....	60
5.3 Comparación de resultados	62
Capítulo 6: Conclusiones y Recomendaciones.....	63
6.1 Conclusiones.....	63
6.2 Recomendaciones.....	63
Referencias Bibliográficas	64

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Figura 1: Ejemplos de tipos de redes de sensores.....	7
Figura 2: Límite político de la ciudad de Kingsville (a), imágenes satelitales superpuestas (b) y estaciones base instaladas actualmente en la ciudad (c).	12
Figura 3: Mapa de caminos de la ciudad de Kingsville (a), distribución poblacional de la ciudad (b), mapa de uso de suelos de la ciudad (c) y superposición final de los mapas (d).	13
Figura 4: Mapa de Centros de salud del distrito de Mt. Elgon. Fuente (Kiptenai y Hunja).....	15
Figura 5: Centros de salud por construir. Fuente: Kiptenai y Hunja.	16
Figura 6: Red Perú-Magneto a la actualidad.	17
Figura 7: Magnetómetro PM-05 instalado en Ite, Tacna.....	18
Figura 8: Sismo ocurrido el 06 de mayo en Tacna, Software de procesamiento del INRAS-PUCP. Fuente: Heraud & Centa, 2014	19
Figura 9: Ejemplo de triangulación de pulsos para la zona norte de Lima. Fuente: Heraud & Centa, 2014.....	20
Figura 10: Trabajos de Instalación del Magnetómetro de Pucusana, PM-12.....	22
Figura 11: Interfase del software QGIS. (Fuente: Elaboración propia)	23
Figura 12: Diagrama de flujo del algoritmo propuesto.	25
Figura 13: Diagrama de flujo del subprograma "Prepara base de datos CCPP".....	28
Figura 14: Proceso Leer página web	29
Figura 15: Mapa del Perú con todos los Centros Poblados reconocidos por el INEI. Fuente: Elaboración propia con base de datos del INEI.....	31
Figura 16: Mapa del Perú con todos los Centros Poblados de departamentos de la costa. Fuente: Elaboración propia con base de datos del INEI.....	31
Figura 17: CCPP con cobertura móvil 3G y 4G de Movistar. Fuente: Elaboración propia con base de datos Movistar.	33
Figura 18: Cobertura en CCPP de la provincia de Ilo, Moquegua	34
Figura 19: Red Vial Nacional. Fuente: MTC	35
Figura 20: Líneas de alta tensión en el Perú. Fuente: OSINERGMIN.....	35
Figura 21: CCPP en distritos de Huaral, Aucallama y Chancay.....	37
Figura 22: Buffer creado alrededor de líneas de transmisión y carreteras.	37
Figura 23: Tiempo de procesamiento empleando en realizar el buffer de distancia.....	38
Figura 24: CCPP ubicados entre 45km y 90km de la estación PM-07 Aucallama... ..	40
Figura 25: CCPP ubicados entre 45km y 90km.	41
Figura 26: Posible expansión de la Red Perú-Magneto.	43
Figura 27: Distribución de CCPP final.	47
Figura 28: Cobertura de los magnetómetros con 60 km. de radio.	48
Figura 29: Expansión de la Red Perú-Magneto priorizando la triangulación de pulsos.....	50
Figura 30: Distribución de CCPP priorizando la triangulación de pulsos.....	51
Figura 31: Segunda opción de ampliación de la Red Perú-Magneto.	52
Figura 32: Área del departamento de Lima.	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I Elementos Articuladores.....	10
Tabla II Paquetes de Operadores Móviles.....	26
Tabla III Número de Centros Poblados por departamento del Perú.....	27
Tabla IV CCPP para el distrito de Sunampe, Chincha-Ica.....	30
Tabla V Número de Centros Poblados.....	30
Tabla VI Número de CCPP con cobertura móvil 3G y 4G por cada operador móvil.....	32
Tabla VII CCPP con cobertura 3G y 4G en la costa del país.....	32
Tabla VIII Coordenadas geográficas de la estación PM-07 Aucallama.....	39
Tabla IX Ejemplo de CCPP escogido.....	42
Tabla X Resumen de la expansión priorizando costos.....	42
Tabla XI Lista de CCPP elegidos para la expansión de la Red Perú-Magneto.....	44
Tabla XII Estadística de la expansión de la Red Perú-Magneto.....	47
Tabla XIII Costo fijo mensual de la expansión de la Red Perú-Magneto.....	49
Tabla XIV Resumen de la expansión priorizando la triangulación de pulsos.....	50
Tabla XV Datos estadísticos de la segunda ejecución del algoritmo.....	51
Tabla XVI Costo fijo mensual de la Red Perú-Magneto.....	53
Tabla XVII Tecnología apropiada de articulación.....	56
Tabla XVIII Organizaciones participantes.....	57
Tabla XIX Sectores o grupos de interés.....	58
Tabla XX Precio total de Magnetómetros para la red de 32 unidades.....	59
Tabla XXI Zonas de la Red de magnetómetros- primera propuesta.....	59
Tabla XXII Costos asociados a la implementación de la red de magnetómetros – 32 unidades.....	60
Tabla XXIII Precio total de Magnetómetros para la red de 71 unidades.....	61
Tabla XXIV Zonas de la red de magnetómetros - segunda propuesta.....	61
Tabla XXV Costos asociados a la implementación de la red de magnetómetros – 71 unidades.....	61
Tabla XXVI Comparación de resultados de proyección económica.....	62

LISTA DE ACRÓNIMOS

CCPP – Centros Poblados

INEI – Instituto Nacional de Estadística e Informática

PUCP – Pontificia Universidad Católica del Perú

INRAS – Instituto de Radioastronomía

VBA – Visual Basic for Applications

VB.Net. – Visual Basic .Net

Introducción

El proyecto Perú-Magneto, desarrollado desde el 2009 por el Instituto de Radioastronomía (INRAS) de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), involucra el estudio de fenómenos electromagnéticos vinculados a sismos. Además del interés netamente científico, el objetivo del proyecto es llegar a anticipar, con un nivel de certeza, el advenimiento de terremotos en la costa del Perú. Para realizar esta investigación, se utilizan sensores de campo llamados magnetómetros. Actualmente, el proyecto cuenta con 10 magnetómetros instalados en localidades estratégicas ubicadas en los departamentos de Lima, Ica, Moquegua y Tacna.

Debido a los importantes descubrimientos científicos que viene realizando el INRAS, y que colocan al Perú a la vanguardia de la investigación en fenómenos pre-sísmicos, existe la necesidad de ampliar la red de magnetómetros. Estos cubrirán con su rango de sensibilidad toda la costa del Perú ya que la zona de estudio es, específicamente, el desplazamiento de rocas que existe entre la Placa Continental y la Placa de Nazca.

Para poder realizar la expansión de la red de magnetómetros, es necesario identificar con anterioridad las posibles zonas en las que estos podrían ser instalados ya que se debe tomar en cuenta factores como: niveles de ruido, conectividad móvil y seguridad o resguardo del equipo. La propuesta de investigación pretende seleccionar, mediante modelos de optimización, las zonas óptimas para los próximos magnetómetros a instalarse tomando en cuenta los factores descritos anteriormente. Del mismo modo, se buscará minimizar el costo anual que tendrá la red de magnetómetros al utilizar distintos operadores de telefonía móvil para realizar la transmisión de datos al INRAS en la PUCP.

El presente trabajo de tesis ha sido estructurado en seis capítulos. El primero abarca todos los conceptos y teoría necesaria para el entendimiento de la problemática y su solución; el segundo, trata el estudio del caso en particular y se plantean los objetivos de la tesis; el tercer capítulo, muestra los algoritmos planteados, así como su ejecución y análisis de resultados; el cuarto capítulo, presenta una propuesta de planeamiento necesaria dada la magnitud de este proyecto; el quinto capítulo está compuesto por una evaluación económica del proyecto y; finalmente en el sexto capítulo, las conclusiones y recomendaciones que se desprenden de esta investigación.

Capítulo 1: Marco Teórico

En este capítulo se describirán los principales conceptos teóricos para que el lector obtenga una idea más clara sobre el tratamiento de datos y algoritmos propuestos en capítulos posteriores. Asimismo, se revisará el estado del arte en cuanto a la investigación de operaciones utilizando Sistemas de Información Geográfica.

1.1 Investigación de Operaciones

La Investigación de Operaciones hace referencia a los problemas relacionados a la coordinación de actividades y conducción de una organización. Sus primeros intentos datan desde la época de la Revolución industrial en donde el rápido crecimiento del tamaño y complejidad de las organizaciones conllevó a tener problemas al momento de manejar eficientemente la planificación y asignación de recursos. Sin embargo, no fue hasta el inicio de la Segunda Guerra Mundial en el que el enfoque en la resolución de este tipo de problemas comenzó a llamarse propiamente Investigación de Operaciones. Actualmente, es aplicada en muchas áreas como manufactura, transporte, construcción, telecomunicaciones, planeación financiera, cuidado de la salud, etc.

1.2 Programación Lineal:

El uso de la programación lineal es considerado uno de los avances científicos más importantes del siglo pasado, ya que ha permitido ahorrar millones de dólares a muchas compañías e industrias en el mundo optimizando la asignación de recursos. Aunque la asignación de recursos y actividades es la aplicación más frecuente, cualquier problema que se ajuste al modelo matemático de la programación lineal puede considerarse como tal. (Hillier & Lieberman, 2015)

Según la definición de Bazaraa (Ferguson, s.f.), un problema de programación lineal consiste en la maximización o minimización de una función lineal sujeta a restricciones lineales. Las restricciones pueden ser tanto igualdades como desigualdades; a continuación, un ejemplo con definiciones básicas:

Considerar el siguiente problema de programación lineal, en donde $c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$ es la función objetivo a ser minimizada y será denotada por z . Los coeficientes c_1, c_2, \dots, c_n son los coeficientes de costo y x_1, x_2, \dots, x_n son las variables de decisión (pueden ser variables, variables estructurales o niveles de actividad) a ser determinadas.

$$\begin{array}{r}
 \text{Minimizar } c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \text{ sujeto a} \\
 a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \geq b_1 \\
 a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \geq b_2 \\
 \vdots \qquad \qquad \qquad \vdots + \dots + \qquad \qquad \qquad \vdots \\
 a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \geq b_m \\
 x_1, \qquad \qquad x_2, \qquad \dots, \qquad x_n \geq 0
 \end{array}$$

La desigualdad $\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \geq b_i$ denota la i -ésima restricción. Los coeficientes a_{ij} para $i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n$ son llamados los coeficientes tecnológicos. Estos coeficientes forman la matriz de restricciones A .

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

La columna del vector cuyo i -ésimo componente es b_i , el cual es el vector al extremo derecho de la matriz anterior, representan los requisitos mínimos a ser satisfechos. Las restricciones $x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0$ son las *restricciones de no negatividad*. Un grupo de valores de las variables x_1, x_2, \dots, x_n que satisfagan todas las restricciones es llamado una *solución factible*. El conjunto de todos los puntos constituye *la región factible* o el *espacio factible*.

A continuación, se representará la terminología utilizada hasta el momento en un ejemplo práctico:

Considerar el siguiente problema lineal

$$\begin{array}{r}
 \text{Minimizar } 2x_1 + 5x_2 \\
 x_1 + x_2 \geq 6 \\
 -x_1 - 2x_2 \geq -18 \\
 x_1, \qquad x_2 \geq 0
 \end{array}$$

Hallar los números x_1 y x_2 que maximicen la suma de $x_1 + x_2$ sujeto a las siguientes restricciones: $x_1 \geq 0, x_2 \geq 0$ y

$$\begin{array}{r}
 x_1 + 2x_2 \leq 4 \\
 4x_1 + x_2 \leq 12 \\
 -x_1 + x_2 \leq 1
 \end{array}$$

En este problema existen dos variables y cinco restricciones. Las dos primeras restricciones son llamadas *restricciones de no negatividad* y son empleadas en la mayoría de problemas de programación lineal, las restricciones restantes son conocidas como *restricciones principales* y la función a maximizar es llamada la *función objetivo*.

1.3 Programación Entera y Programación Entera Mixta:

Un problema de programación entera se presenta en muchos casos prácticos en los que se requiere que las variables tengan un valor entero para que la solución encontrada tenga sentido; por ejemplo, al momento de asignar personas, vehículos o máquinas. El modelo matemático para este tipo de problemas sería el mismo que el de la programación lineal con la restricción adicional de que las variables deben de tomar un valor entero. En el caso de que solamente algunas de las variables deban de tener un valor entero y otras no, se conocerá al modelo como Programación Entera Mixta (Hillier & Lieberman, 2015). A continuación, se mencionarán problemas típicos de la programación entera y mixta.

1.3.1 Cobertura de Área:

En este tipo de problemas se tiene un conjunto de elementos M y una colección N de subconjuntos de M , el objetivo es escoger el mínimo número de subconjuntos que combinados cubran el área entera. La aplicación de este problema se da, mayormente, en el planeamiento y expansión de redes de telecomunicaciones; sin embargo, debido a que en la realidad el factor de los costos de operación y mantenimiento varían por localidad y tienen una alta prioridad se suele considerar, también, tener como objetivo el mínimo costo cubriendo la totalidad del área en donde se asigna un costo no negativo a cada subconjunto (Siomina, 2007). El modelo matemático sería el siguiente:

$$\begin{aligned} & \text{minimizar } \sum_{j \in N} c_j x_j \\ & \text{Sujeto a: } \sum_{j \in N} a_{ij} x_j \geq 1 \quad i \in M \\ & x_j \in \{0,1\} \quad j \in N \end{aligned}$$

En donde x_j es una variable binaria que es igual a uno solamente si el subconjunto j es seleccionado, y a_{ij} es el elemento de incidencia de la matriz A dado que $a_{ij} = 1$ si y solo si el elemento i es cubierto por un subconjunto j .

1.3.2 Ubicación de instalaciones:

Se tiene un conjunto de posibles instalaciones llamado M y un conjunto de clientes N . El problema supone el costo fijo f_i que representa el abrir una nueva instalación en la locación i y también un costo de transporte c_{ij} asociado a cada instalación $i \in M$ y a cada cliente $j \in N$. El problema consiste en decidir qué nuevas instalaciones abrir, y que instalación sirve a cada cliente minimizando la suma de los costos fijos y de transporte, además de que cada cliente deberá ser asignado a solamente una

instalación. Se debe resaltar que el problema es similar al problema de la cobertura de área con la excepción de que en este se agregan los gastos de transporte. El modelo matemático sería el siguiente:

$$\begin{aligned} & \text{minimizar} \quad \sum_{i \in M} \sum_{j \in N} c_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in M} f_i y_i \\ & \text{sujeto a : } x_{ij} \leq y_i \quad i \in M, j \in N \\ & \quad \sum_{i \in M} x_{ij} = 1 \quad j \in N \\ & \quad x_{ij} \in \{0,1\} \quad i \in M, j \in N \\ & \quad y_i \in \{0,1\} \quad i \in M \end{aligned}$$

En la formulación, la variable $y_i = 1$ si y solamente si la instalación i es utilizada, y $x_{ij} = 1$ si y solamente si el cliente j ha sido asignado a la instalación i . Se debe resaltar que, en la formulación del problema, las variables x son continuas, esto es, $x_{ij} \geq 0, i \in M, j \in N$.

Una variación del modelo se presenta cuando se agrega a cada instalación i tiene una capacidad máxima Q_i y cada cliente $j \in N$ tiene una demanda d_j . La restricción que se añadiría al modelo sería la siguiente:

$$\sum_{j \in N} d_j x_{ij} \leq Q_i y_i \quad i \in M$$

Esta última restricción hace redundantes a las primeras; sin embargo, estas se deben mantener para hacer la formulación más eficiente (Siomina, 2007).

1.4 Programación no Lineal:

La Programación no Lineal se encarga de optimizar una función objetivo con la presencia de igualdades o desigualdades como restricciones, con la característica de que alguna de estas puede ser una función no lineal (Mokhtar S., Hanif D., & C.M., 2006). Hillier y Lieberman (2015), plantean la definición de la programación no lineal en encontrar $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ para maximizar $f(x)$,

Sujeto a: $g_i(x) \leq b_i$, para $i = 1, 2, \dots, m$, $y x \geq 0$

Donde $f(x)$ y $g_i(x)$ son funciones dadas de n variables de decisión.

Las aplicaciones de este tipo de programación, al igual que la lineal y entera, son muy variadas y van desde problemas de mezcla de productos o insumos con elasticidad de precios, problemas de transporte con descuentos por volumen, selección de una cartera de inversiones riesgosas, etc.

1.5 Redes de sensores:

Los sensores sirven como enlace entre el mundo físico y el digital al capturar fenómenos que ocurren en la naturaleza y transformarlos en datos que pueden ser procesados, almacenados y estudiados. Se encuentran integrados en una amplia gama de equipos, máquinas y ambientes, demostrando así un gran beneficio social. Los sensores pueden, entre otras cosas, evitar fallas catastróficas en infraestructuras, ayudar a preservar regiones naturales, incrementar la productividad, mejorar la seguridad, etc. (Dargie & Poellabauer, 2010).

En la actualidad, las redes de sensores inalámbricos son consideradas una de las herramientas más efectivas para realizar el monitoreo y seguimiento a aplicaciones como el monitoreo de eventos sísmicos, salud y estado de pacientes, agricultura, etc. (Rebai, Le berre, Snoussi, Hnaien , & Khoukhi, 2015).

Las redes de sensores inalámbricos están compuestas por sensores o nodos conectados. Los nodos se caracterizan por ser pequeños en tamaño con una cantidad de energía limitada suministrada por una batería, normalmente se comunican a través de antenas con señales de RF (Mulligan & Ammari M., 2010). Cada nodo es capaz de recolectar, procesar, almacenar y transmitir información a una estación base (Rebai, Le berre, Snoussi, Hnaien , & Khoukhi, 2015)

1.5.1 Tipos de Redes de Sensores

Las redes de sensores pueden operar en diferentes arquitecturas y escenarios operativos; por ejemplo, dentro de una red, algunos sensores pueden tener equipos más avanzados que les permite hacer más tareas frente a otros sensores de la misma red. Wang (Bang, 2010), describe seis características típicas de las redes de sensores:

- **Redes Homogéneas y Heterogéneas:** En una red homogénea, todos los sensores tienen la misma sensibilidad, poder de procesamiento, y equipos de comunicación; por otro lado, en una red heterogénea uno de los sensores puede tener mayor sensibilidad y estar encargado de cubrir un área mayor respecto a los otros.
- **Redes Estacionarias y Móviles:** En una red estacionaria, todos los sensores son estáticos y no pueden desplazarse una vez realizada la instalación. Una red móvil se encuentra equipada con una unidad móvil que puede colocar los sensores con la intención de mejorar el desempeño de la red. Se puede considerar una red híbrida compuesta por ambos tipos de sensores.
- **Redes *Single-Hop* y *Multi-Hop*:** Esta característica se enfoca en el tipo de comunicación que existe entre los sensores de la red y la estación base. En la

comunicación *single-hop*, todos los sensores envían directamente la información a la estación base; por otro lado, en la comunicación *multi-hop* la transmisión de datos es indirecta y algunos sensores utilizan a otros sensores como “estaciones base de paso” para poder transmitir la información hasta la estación base. El uso de la comunicación *multi-hop* se debe a temas de costos ya que mantener un enlace de comunicación directa, ya sea inalámbrico o alámbrico, entre los sensores y la estación base puede resultar muy costoso en redes de sensores que operan en un área muy extensa.

En la figura 1 se ilustran algunas configuraciones de redes de sensores; por ejemplo, Una red *single-hop*, heterogénea y estacionaria (a); una red *multi-hop*, homogénea y estacionaria (b); Una red *multi-hop*, heterogénea y estacionaria (c) y finalmente, una red *single-hop*, homogénea, estacionaria y con una estación base móvil (d).

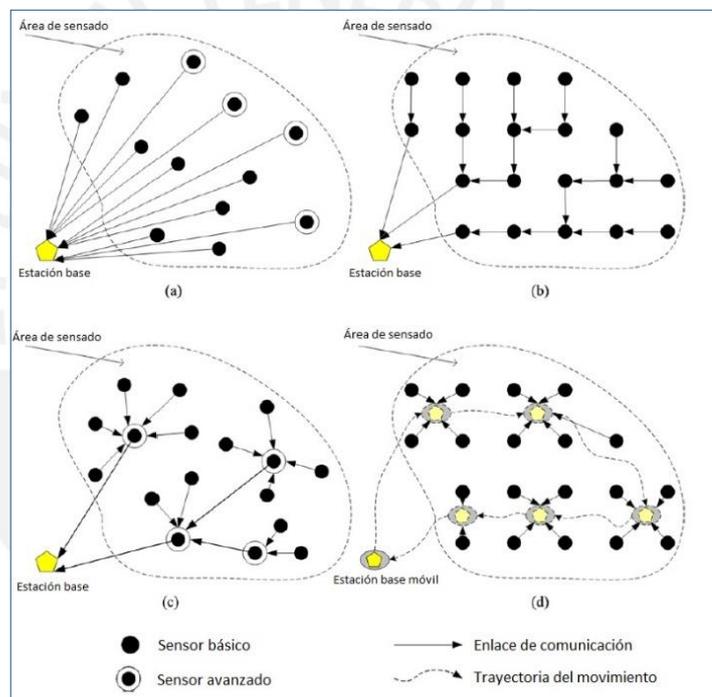


Figura 1: Ejemplos de tipos de redes de sensores.

1.5.2 Desafíos en las de Redes de Sensores:

Si bien las redes de sensores han demostrado grandes beneficios en sus diferentes aplicaciones, existen desafíos técnicos al momento de realizar su diseño, implementación o expansión. Según Wang (2010), los principales desafíos que se presentan, y que no son diferentes a los de otros tipos de redes, son los siguientes:

- **Eficiencia de Energía:** Es importante considerar el uso eficiente de la energía en los sensores ya que, en la mayoría de las aplicaciones, estos se encuentran instalados en zonas remotas por tiempos muy prolongados. Por ese motivo, implementar sistemas de ahorro de energía o recurrir al uso de

energías renovables es una prioridad al momento de considerar los costos de instalación de la red.

- Autonomía de la red: Las redes de sensores pueden estar instaladas siguiendo un patrón específico u aleatoriamente dentro de una zona de interés. En cualquiera de los casos, cada sensor debe de tener la capacidad de auto diagnosticar su funcionamiento y adaptar sus parámetros para afrontar diferentes situaciones. Esto con el fin de que, debido a la locación remota de algunos sensores, el tener servicios de mantenimiento al momento de presentar una falla puede tomar un tiempo debido a temas logísticos.
- Escalabilidad de la red: En algunos tipos de aplicaciones, el número de sensores utilizados se encuentra en el orden de los cientos, miles o hasta millones. En este tipo de redes a gran escala, el garantizar el desempeño óptimo de la red a pesar de la inclusión de nuevos sensores es crítico. Para esto se emplean diversos algoritmos y protocolos diseñados para este tipo de redes.
- Tolerancia a fallas: Algunas locaciones en los que los sensores deben de operar son ambientes hostiles y duros, por ese motivo, la robustez y la tolerancia a fallas en los equipos y algoritmos es un factor que debe ser tomado en cuenta según la circunstancia de operación del sensor.
- Precisión de los datos: El obtener datos precisos es uno de los principales objetivos en una aplicación de red de sensores; sin embargo, para alcanzar ese objetivo es necesario considerar el número de sensores y las prestaciones técnicas de estos. Esto se encuentra ligado también al consumo de energía que mantendrán y finalmente impacta en los costos de instalación de toda la red.
- Seguridad de la información: La seguridad de los datos es un requisito básico en cualquier tipo de red, se requiere que los datos obtenidos sean accedidos, transmitidos y procesados segura y privadamente.

1.6 El Planeamiento Adaptativo

Es un enfoque que, según (Melo M. , 1987) surgió como respuesta a la crítica del concepto de planificación que se tenía durante el ciclo pasado, este concepto se basaba en dos enfoques: el “Planeamiento Racional Compresivo” caracterizado por ser centralizado, secuencial y sistemático. Mientras que el “Incrementalismo Disjunto” se caracterizó por ser de completa fragmentación y espontáneo.

El planeamiento Adaptativo surge de la síntesis de los dos enfoques descritos anteriormente; es decir, se caracteriza por dar prioridad al nivel normativo, pero con un grado relativamente alto de flexibilidad, y a la vez busca cambios en el sistema con constantes innovaciones. (Melo & Magacho, 2013). Existen tendencias o estrategias para aplicar el Planeamiento Adaptativo, básicamente se diferencian en cómo aplican la normativa: tomando al sistema como un todo o enfocándose en partes del sistema. Es en este último enfoque en el cual se desarrolla el método del Incrementalismo Articulado.

1.6.1 El Incrementalismo Articulado

Es una estrategia para el Planeamiento Adaptativo planteada por (Melo M.), el concepto de Incrementalismo se basa en los esfuerzos en hacer que un sistema se mueva como un todo hacia un estado deseado, todo esto con acciones complementarias o de soporte por el cual se le denomina también Articulado.

Para un Planeamiento bajo el enfoque del Incrementalismo Articulado (Melo M. , 1977) recomienda los siguientes pasos:

a) **Identificación de la Tarea Articuladora**

b) **Especificación del Instrumento articulador**

Este medio debe estar relacionado con los objetivos de la tarea articuladora, para garantizar el mantenimiento y fortalecimiento de los grados de articulación alcanzados.

c) **Selección de núcleo**

Una o más partes de la multi-organización con un fuerte interés en el Proyecto deben ser seleccionadas para constituir el núcleo de la multi-organización articulada.

d) **Deflagración del proceso por actores clave**

Los actores clave dentro de estas organizaciones centrales deben iniciar el proceso para el cual pueden necesitar la asistencia de un consultor externo.

e) **Interligación gradual de otras partes**

Gradualmente, otras partes de la multi-organización deben estar vinculadas al núcleo, involucrando a sus miembros en la tarea articuladora.

f) **Desarrollo de lazos transversales**

Permite los grupos desarrollar segmentos autónomos del Proyecto que afectan solo a estos grupos específicos.

g) **Mantenimiento**

Mantener el proceso utilizando una herramienta articuladora y empleando los pasos anteriormente descritos.

De acuerdo con (Melo M. , 1977), cada organización de acuerdo a sus características requiere de una estrategia de articulación distinta, en la siguiente tabla se muestra distintos casos según el tipo de organización

*Tabla I
Elementos Articuladores.*

Elemento Articulador		Características de la Organización	Estrategia para la articulación
Central	Sectorial		
Fuerte	Fuerte	Se proporciona una articulación apropiada. Los elementos centrales y periféricos operan de manera complementaria. La estrategia proporcionada por la vista integral central se vuelve operativa al verificar constantemente la realidad proporcionada por la unidad sectorial.	Esta es la situación ideal. Una estrategia articulada debe apuntar a mantener su equilibrio
Fuerte	Débil	El elemento central ignora lo sectorial. La importancia de implementar planes no se destaca y el plan se convierte en el final del proceso de planificación. El grado de articulación es pobre	Cree terminales sectoriales fuertes asignando personal capacitado a los sectores. Establecer un proceso de aprendizaje, a través del desarrollo de tareas articuladas. Diseñar herramientas articuladas.
Débil	Fuerte	El sector desarrolla sus propios planes independientemente de sus efectos en general. El énfasis está en la ejecución, y se buscan resultados inmediatos. El grado de articulación es pobre.	Desarrollar un entendimiento en la unidad central del sector. Dale herramientas coordinativas e integradoras. Crear en el sector una conciencia de su interdependencia con el conjunto. Utilizar la tarea articuladora para desprogramar comportamientos previos.
Débil	Débil	Los sectores se involucran en tareas rutinarias y el sistema simplemente se mueve. Su probabilidad de supervivencia en un entorno turbulento es baja.	Si bien esta puede parecer la situación más difícil, es más fácil desarrollar simultáneamente en ambos extremos el equipo de capacidades articuladora para reprogramar una de las partes mientras se monitorea el desarrollo de la otra. La tarea articuladora y las herramientas son necesarias aquí

Fuente (Melo,1977)

1.7 Software GIS:

El Sistema de Información Geográfica o GIS, por sus siglas en inglés, se utiliza para manejar, recuperar, almacenar, mostrar y analizar cualquier tipo de datos geográficos y espaciales. Puede facilitar el entendimiento de aspectos sociales y económicos relacionándolos con recursos naturales u otras variables del mundo físico. Una de las principales aplicaciones del software GIS para áreas rurales o remotas es el mapeo de tierras y recursos, el planeamiento y desarrollo de áreas, así como la administración de riesgos naturales (Mustafa, Din, Ismail, & Omar, 2012).

Actualmente existe una gran variedad de software GIS que permite realizar los trabajos e investigaciones descritas anteriormente, también existe software GIS de código abierto que es el que se utilizará en el presente trabajo de tesis. A continuación, algunos ejemplos de aplicación de este software:

1.7.1 Optimización de una red de telefonía celular:

El uso de la programación lineal y no lineal puede ser aplicado a diversas áreas, en este caso se resaltará el uso de la Programación no Lineal para la optimización de una red de telefonía celular planteado por Karaulkar y Oh (2016). Las estaciones base son elementos importantes en una red de telefonía celular ya que son el medio entre los celulares y las llamadas de entrada y salida que tiene un usuario regular, por ese motivo es importante que la cobertura de la red sea amplia y tenga una señal fuerte para garantizar la satisfacción del usuario con el servicio recibido. Bajo esta premisa la localización de las estaciones base toma en consideración factores geográficos específicos como la distribución de la población y la infraestructura del transporte, además de la altura y localización de edificios y la atenuación de la señal a través de las paredes.

Para la investigación de Karaulkar y Oh (2016), se seleccionó la ciudad de Kingsville en el estado de Texas, Estados Unidos. Como primera acción se realizó un análisis utilizando software GIS para poder tener en un solo mapa el límite político de la ciudad de Kingsville con imágenes satelitales. Posteriormente, se ubicaron en el mapa las estaciones base de telefonía celular actualmente instaladas en la ciudad como puede ser apreciado en la figura 2.

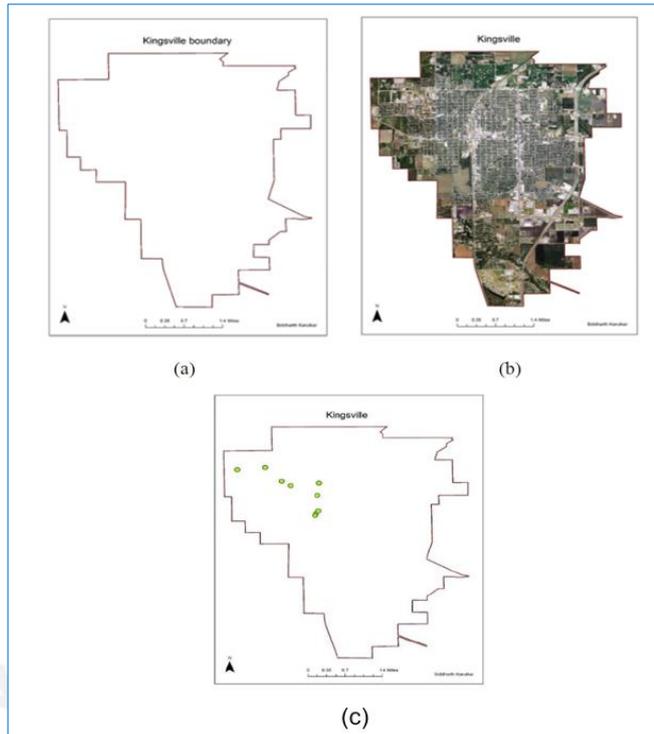


Figura 2: Límite político de la ciudad de Kingsville (a), imágenes satelitales superpuestas (b) y estaciones base instaladas actualmente en la ciudad (c).

El análisis en el software GIS debe de considerar los caminos establecidos en la ciudad para la accesibilidad a las nuevas estaciones base, el uso de tierras para evitar así áreas inaccesibles y el factor con mayor consideración es la distribución de la población; por ese motivo, mapas con estas características fueron empleados. El mapa del uso de tierras de la ciudad de Kingsville (figura 3) fue de gran utilidad ya que permitió identificar los porcentajes en los que una región se encuentra cubierta por bosques, zonas agrícolas, humedales, así como zonas urbanizadas. Con el uso de estos mapas se tuvo una idea muy aproximada de dónde debería ser la locación para las nuevas estaciones base.

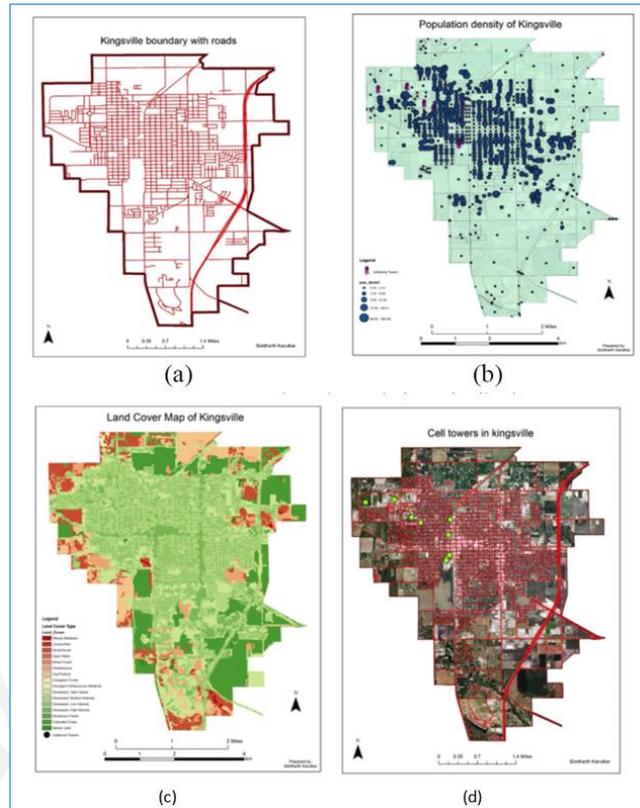


Figura 3: Mapa de caminos de la ciudad de Kingsville (a), distribución poblacional de la ciudad (b), mapa de uso de suelos de la ciudad (c) y superposición final de los mapas (d).

Posteriormente Karakulkar y Oh (2016), utilizaron la técnica de la Programación no Lineal para encontrar la locación óptima para las estaciones base. Los criterios para el algoritmo fueron los siguientes:

- El fácil acceso a las torres de celular para simplificar las labores de mantenimiento posteriores.
- Obtener una cobertura óptima manteniendo una distancia óptima entre dos torres celulares.
- El rango de cobertura de las torres celulares debe de cubrir en su totalidad el área poblada de la ciudad para un mejor servicio.

Es así que se plantearon las siguientes variables del modelo de PNL.

(q_X, q_Y) : Coordenadas del centro de investigación (TAMUK).

(w_X, w_Y) : Coordenadas de las posibles locaciones para una nueva estación base.

(b_X, b_Y) : Coordenadas de la posible locación de la primera área residencial con una nueva estación base.

(c_X, c_Y) : Coordenadas de la posible locación de la segunda área residencial con una nueva estación base.

(e_{iX}, e_{iY}) : Coordenadas seleccionadas como humedales, donde $i = 1, 2, \dots$

- (r_{iX}, r_{iY}) : Coordenadas de zonas de agua, donde $i = 1, 2, \dots$
 (t_{iX}, t_{iY}) : Coordenadas de puntos dentro de caminos, donde $i = 1, 2, \dots$
 (v_{iX}, v_{iY}) : Coordenadas de torres celulares existentes, donde $i = 1, 2, \dots$

Entonces, la función objetivo sería:

$$\text{Minimizar: } \sqrt{(q_X - w_X)^2 + (q_Y - w_Y)^2} + \sqrt{(q_X - b_X)^2 + (q_Y - b_Y)^2} \\ + \sqrt{(q_X - c_X)^2 + (q_Y - c_Y)^2}$$

La nueva locación está sujeta a las siguientes restricciones:

- Humedales: La fuente de energía de la estación base debe estar alejada una distancia, ϵ , de los humedales, donde $\epsilon = 0.4$ Km.

$$\sqrt{(q_X - e_{iX})^2 + (q_Y - e_{iY})^2} \geq \epsilon$$

- Cuerpos de agua: La fuente de energía de la estación base debe de estar alejada una distancia, ρ , de algún cuerpo de agua, donde $\rho = 0.4$ Km.

$$\sqrt{(q_X - r_{iX})^2 + (q_Y - r_{iY})^2} \geq \rho$$

- Caminos: La fuente de energía de la estación base debe de estar ubicada una distancia, η , de los caminos, donde $\eta = 0.04$ Km y no debe de exceder una distancia, τ , donde $\tau = 0.05$ km.

$$\eta \geq \sqrt{(q_X - t_{iX})^2 + (q_Y - t_{iY})^2} \geq \tau$$

- Torres celulares: Las torres celulares no deben estar localizadas una distancia, ξ , unas de otras, donde $\xi = 1.83$ km y no deben de exceder una distancia, ω , donde $\omega = 3.2$ km

$$\xi \geq \sqrt{(q_X - t_{iX})^2 + (q_Y - t_{iY})^2} \geq \omega$$

La investigación concluye con la presentación de estos algoritmos, los autores aclaran que, para poder aplicar esta opción a la realidad, deberán tomarse en cuenta también los costos de los terrenos, barreras tecnológicas y otros factores a tomar en cuenta que han sido cubiertos en puntos previos de este capítulo. Se debe resaltar la integración del software GIS con herramientas de PNL para el planeamiento de expansión de una red.

1.7.2 Modelo de localización – asignación para mejorar acceso centros de salud:

Para el siguiente caso, planteado por (Kiptenai & Hunja, 2013) se tuvo como objetivo mejorar el acceso de la población a centros de salud del distrito de Mt. Elgon. Para esto se tuvo como premisa establecer que cada centro de salud debería ser construido a 5 km. de distancia uno de otro; sin embargo, en la práctica esta premisa no tenía en consideración el terreno del distrito, los estados de los caminos rurales y los medios de transporte de la población.

Por ese motivo se decidió proponer un modelo utilizando software GIS que proponga locaciones optimas para la construcción de nuevos centros de salud. Uno de los métodos para lograr esto es utilizar un modelo de localización – asignación en donde se minimiza el tiempo de viaje entre los centros de salud y los puntos de demanda (población). Para el modelo se utilizarán como datos de entrada una base de datos de población obtenida a través de censos, mapas de carreteras y caminos, estadísticas de enfermedades en la zona e imágenes satelitales.

Como investigación de este caso, los autores encontraron de que solo el 62.5% de la población podía acceder a un centro de salud ubicado a una distancia no mayor a 5 km. de su ubicación. En la siguiente figura se tiene el mapa del distrito en mención y la ubicación de los centros de salud existentes, así como los puntos de demanda representados en color rojo.

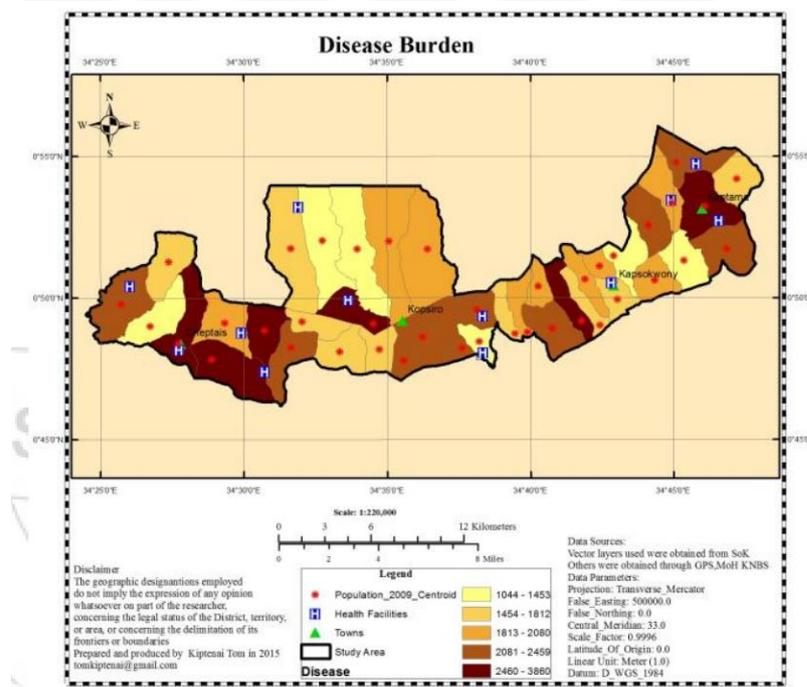


Figura 4: Mapa de Centros de salud del distrito de Mt. Elgon. Fuente (Kiptenai y Hunja)

Finalmente, mediante el procesamiento de datos y utilizando las herramientas del software GIS en las que se identificaron y procesaron que puntos de demanda no eran atendidos por un centro de salud. Kiptenai y Hunja llegaron a la conclusión de que se debería construir 6 centros de salud adicionales a los existentes, con estos nuevos centros el índice de accesibilidad aumentaría al 90%. En la siguiente figura pueden identificarse las nuevas locaciones encerradas en círculos:

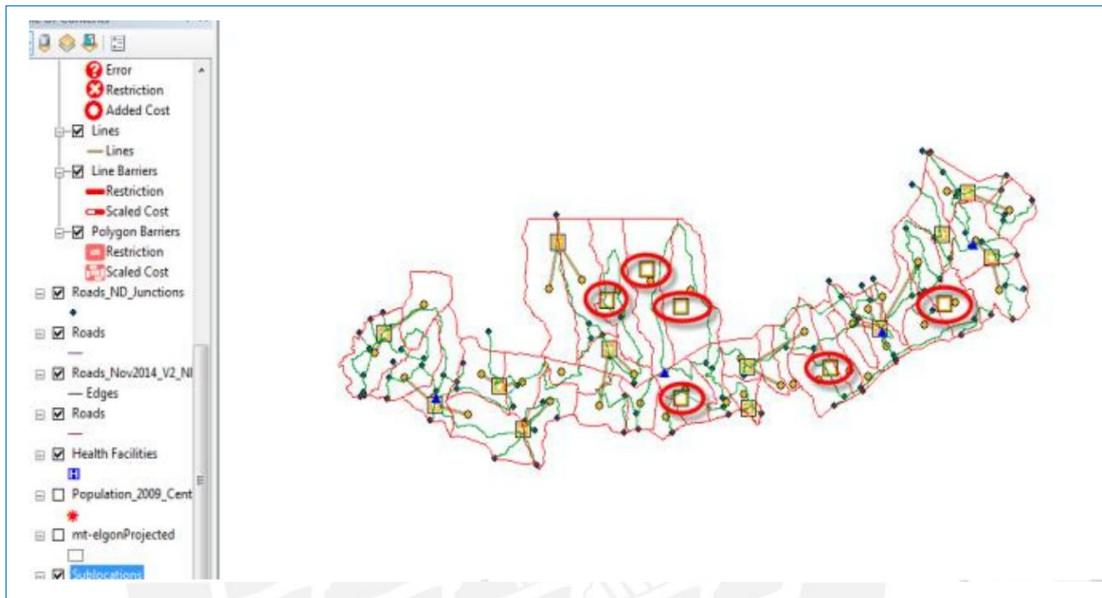


Figura 5: Centros de salud por construir. Fuente: Kiptenai y Hunja.

Capítulo 2: Situación Actual

En este capítulo se describirá al Proyecto Perú-Magneto, el cual es objetivo del modelo de optimización propuesto en este trabajo de investigación. Posteriormente, se describirán los objetivos a alcanzar, así como consideraciones específicas a tener en cuenta para el desarrollo de este trabajo de investigación.

2.1 El Proyecto Perú-Magneto

El proyecto Perú-Magneto, se desarrolla desde el 2009 por el Instituto de Radioastronomía (INRAS) de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), involucra el estudio de fenómenos electromagnéticos vinculados a sismos, englobando el análisis de los procesos físicos y geofísicos que derivan en dichos fenómenos para un mejor entendimiento de sus fundamentos y llegar a comprender, en mayor medida, sus consecuencias.

Para realizar esta investigación, se utilizan sensores de campo llamados magnetómetros. Actualmente, el proyecto cuenta con 10 magnetómetros instalados en localidades estratégicas ubicadas en los departamentos de Lima, Ica, Moquegua y Tacna. Estas localizaciones priorizan zonas de mayor actividad sísmica, basadas en información obtenida del mapa sísmico del Perú.



Figura 6: Red Perú-Magneto a la actualidad.

Los magnetómetros son equipos autónomos ya que son capaces de proveer su propia energía para su funcionamiento las 24 horas del día. Están compuestos por 03 sensores que son enterrados en el suelo y que detectan pulsaciones electromagnéticas locales en un radio aproximado de 60km (Cutler, Bortnik, Dunson, Doering, & Bleier, 2007), paneles solares, una caja con una batería de 12V y una segunda caja que contiene: circuitos electrónicos para filtrar las señales captadas por los sensores, el CPU que mantiene funcionando la estación, un módem 3G para transmisión de datos y finalmente, antenas de comunicación. En la siguiente figura, se puede apreciar un magnetómetro típico del proyecto Perú-Magneto



Figura 7: Magnetómetro PM-05 instalado en Ite, Tacna

Durante sus inicios, en el año 2010, el Proyecto Perú-Magneto contaba solamente con un magnetómetro instalado en la zona sur del país, específicamente en Los Palos-Tacna. Los primeros estudios realizados por el proyecto fueron post-sísmicos; es decir, se estudiaban los datos recopilados por un magnetómetro una vez ocurrido un sismo en zonas aledañas a este. Poco tiempo después de la instalación del magnetómetro de Los Palos, se detectó una cantidad anormal de pulsos electromagnéticos 14 días antes de un sismo de 6.5ML ocurrido el 06 de mayo del

año 2010. El análisis de los pulsos realizado por Heraud et al., (2011) indica que existe una relación entre la dirección (azimut) de los pulsos electromagnéticos y el epicentro del sismo.

En la figura 6, se aprecia que para dicho evento sísmico el software desarrollado en el INRAS muestra la dirección de los pulsos electromagnéticos detectados días antes de la ocurrencia (líneas azules), la dirección del posible epicentro del sismo luego del procesamiento de datos (línea roja) y finalmente, el epicentro del sismo reportado por el Instituto Geofísico del Perú (estrella amarilla). En la línea de tiempo de la parte inferior se puede observar la aparición de los pulsos (líneas azules) en promedio 15 días antes de la ocurrencia del sismo (línea amarilla). Es necesario recalcar que los magnetómetros de Pocollay e Ite no se encontraban instalados en esa fecha. (Heraud & Centa, 2014)

Meses después, el mismo fenómeno se presentó y se pudo anticipar con 15 días un sismo en la misma localidad el 22 de octubre del 2010, esta vez de una magnitud de 4.2ML (Heraud & Centa, 2014). Como consecuencia de estos descubrimientos se decidió instalar progresivamente las demás estaciones que actualmente componen la red de magnetómetros Perú-Magneto.

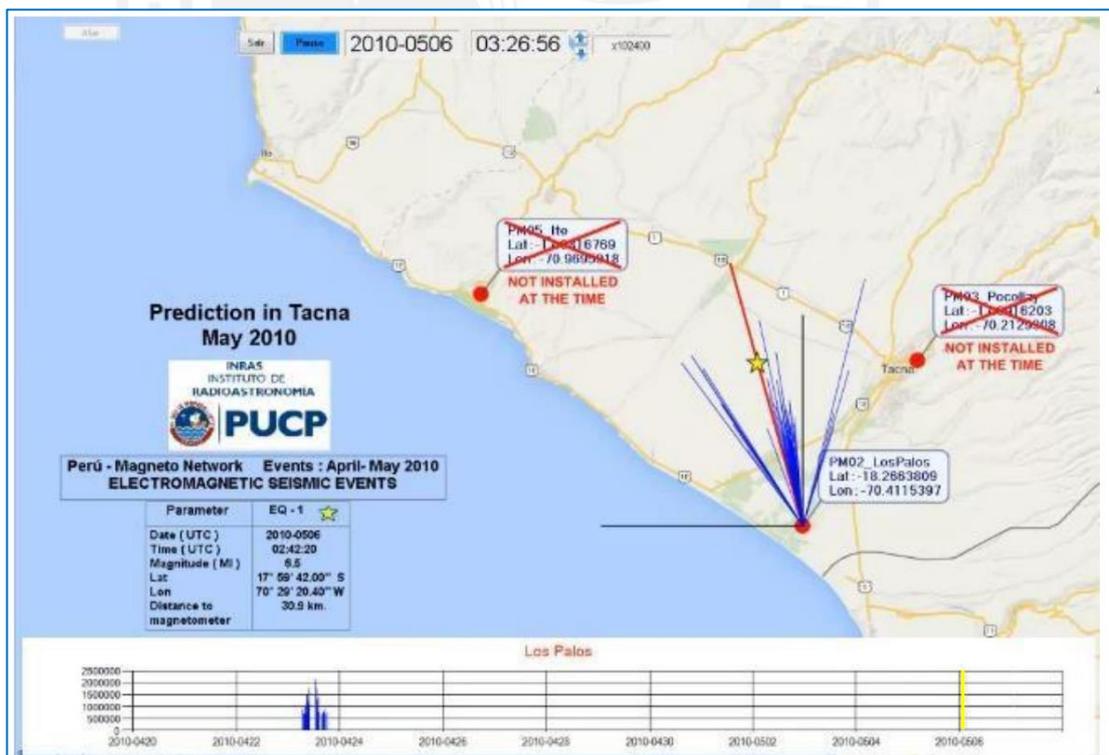


Figura 8: Sismo ocurrido el 06 de mayo en Tacna, Software de procesamiento del INRAS-PUCP.

Fuente: Heraud & Centa, 2014

Con la posterior instalación de los magnetómetros de la Isla San Lorenzo y Aucallama, ubicados frente a La Punta, Callao y al norte de Lima respectivamente, y debido a la cercanía de estos, se puede realizar la triangulación de pulsos. Esta consiste en que dos o más magnetómetros, ubicados en diferentes lugares pero que intersequen sus rangos de sensibilidad entre ellos, detecten en el mismo instante de tiempo la dirección para un mismo pulso electromagnético y así determinar el origen espacial de este y, de acuerdo con Heraud, Centa, & Bleier (2017), considerarlo como un posible punto de stress entre las placas tectónicas que finalmente puede convertirse en un rompimiento entre estas y desencadenar un evento sísmico.

Según estudios previos realizados por Heraud y Centa (2014), “la triangulación de pulsos refuerza la selectividad ya que constituye un doble filtro en la aceptación temporal de los pulsos y su precisión ha sido demostrada en la alta coincidencia espacial de eventos.” En la figura 7 se puede apreciar la Zona de cobertura en el norte de Lima entre los magnetómetros instalados en Aucallama y en la Isla San Lorenzo. Los puntos negros representan los pulsos electromagnéticos triangulados por ambos magnetómetros, mientras que los círculos color rojo oscuro indican la ubicación estadística del “probable epicentro” procesado por el software del INRAS. En la línea de tiempo, en la parte inferior de la imagen, aparecen los pulsos que ocurren simultáneamente en ambas estaciones; color verde para San Lorenzo y color fucsia para Aucallama.



Figura 9: Ejemplo de triangulación de pulsos para la zona norte de Lima.

Fuente: Heraud & Centa, 2014

Debido a estos importantes hallazgos, el INRAS se ve en la necesidad de incrementar la cantidad de magnetómetros instalados con el fin de poder cubrir más área de estudio e incrementar el conocimiento adquirido en estos años de desarrollo del proyecto.

Para esto se plantea la instalación de, aproximadamente, 60 magnetómetros adicionales a los 10 existentes para cubrir la totalidad de la costa del Perú. La ampliación de la red se hace en esta región geográfica debido al rango de sensibilidad de los magnetómetros (aproximadamente 60km a la redonda) y porque la zona de estudio es, específicamente, el desplazamiento de rocas que existe entre la Placa Continental y la Placa de Nazca.

2.2 Consideraciones para la instalación de un magnetómetro

Las siguientes condiciones han sido tomadas en cuenta desde la primera instalación de un magnetómetro en el año 2009 en El Carmen, Ica. Hasta el más reciente en Pucusana, Lima en el año 2018.

- La zona de instalación debe contar con cobertura móvil de internet 3G o 4G para poder realizar la transmisión de datos al INRAS para su posterior procesamiento.
- No debe haber líneas de alta tensión en los alrededores, ya que estas generan ruido eléctrico y dificulta el proceso de detección de pulsaciones electromagnéticas.
- Se debe evitar la presencia de fuentes de ruido mecánico como: fábricas, carreteras o autopistas con alto tránsito de vehículos, zonas con alto flujo de personas, etc.
- Los magnetómetros deben estar instalados en sitios que ofrezcan cierto grado de seguridad para los equipos, en lo que va del proyecto se han instalado en propiedades privadas sin ningún cobro por el terreno que ocupan.
- Para facilitar las labores de instalación y de mantenimiento, el lugar de instalación debe ser de fácil acceso vial.
- Para temas de expansión de la red, cada magnetómetro debe estar ubicado a una distancia aproximada de 60km para poder realizar triangulaciones de pulsos con el magnetómetro más cercano.

Para ubicar las zonas de instalación se realizaron viajes de exploración en los que se consultaba con pobladores locales sobre posibles sitios con las características adecuadas para alojar un magnetómetro, estos viajes tomaban alrededor de dos días de constante exploración. Una vez ubicado un posible sitio, el personal del INRAS realizaba pruebas de ruido que pudiesen afectar al magnetómetro y también pruebas

de conexión a internet móvil 3G. De cumplir el sitio con las características deseadas, se realizaba la instalación.



Figura 10: Trabajos de Instalación del Magnetómetro de Pucusana, PM-12.

2.3 Objetivos

2.3.1 Objetivo General

Minimizar el costo anual que tendría la expansión de la red del proyecto Perú-Magneto en el uso de operadores móviles para la conexión a internet y transmisión de datos.

2.3.2 Objetivos Específicos

- El algoritmo definirá las posibles zonas de instalación para los nuevos magnetómetros en la expansión de la red.
- El algoritmo permitirá, también, seleccionar la ubicación de magnetómetros a petición de un usuario para obtener configuraciones de redes personalizadas que no necesariamente busquen minimizar los costos de conexión a internet.

Capítulo 3: Estudio del caso

En este capítulo se describirá, en primer lugar, el software a utilizar; posteriormente se presentará el algoritmo y se detallará las etapas que lo componen. e realizó el tratamiento de datos para el modelo de optimización planteado; posteriormente, se detallará el algoritmo a utilizar para llegar a los objetivos planteados.

3.1 Software a utilizar

Los CCPP y las fuentes de ruido representan, para esta investigación, una cantidad considerable datos para procesar. Por ese motivo se ha decidido utilizar dos tipos de software:

QGIS: Este es un software de Sistema de Información Geográfica (GIS) que permite analizar y editar información espacial. Es compatible también, con múltiples formatos de archivos para manejar bases de datos; así como archivos de formato *shape* que guardan información de elementos geográficos.

Este software además permite la conexión para utilizar mapas de código abierto como Google Earth, Google Maps, OpenStreetMap, etc. Lo cual hace más sencilla la interpretación gráfica de los resultados obtenidos. Uno de los atributos más resaltantes de QGIS es que tiene una plataforma de programación integrada, específicamente con el lenguaje de programación Python el cual es muy usado en varias aplicaciones. Finalmente, el software QGIS es de licencia libre; es decir, no representará ningún tipo de gasto para esta investigación.

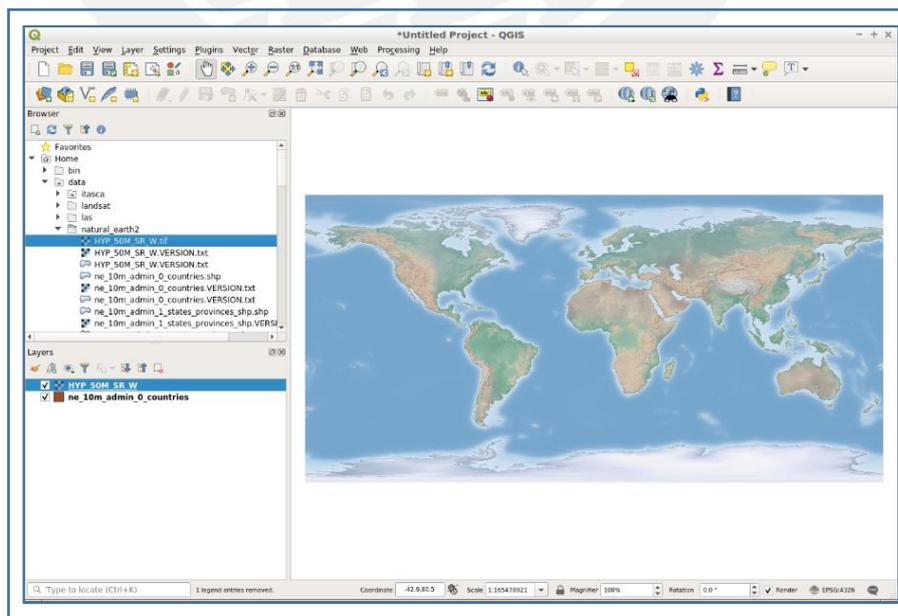


Figura 11: Interfase del software QGIS. (Fuente: Elaboración propia)

MS Excel: Si bien es cierto que la función principal de MS Excel es ser una hoja de cálculo, la gran versatilidad de este software permite darle otras utilidades como, por ejemplo, el manejo de una base de datos. Los datos recopilados de internet de los CCPP y operadores móviles son canalizados fácilmente a una hoja de datos para ser procesados posteriormente. MS Excel, permite también una navegación rápida y sencilla a través de sus opciones de filtrado de datos. Es importante resaltar la opción de programar macros a través del lenguaje de programación VBA y también las facilidades con las que se puede editar un archivo de MS Excel con el software Visual Studio con el lenguaje de programación VBNet.

3.2 Presentación del algoritmo

Para cumplir con los objetivos de esta tesis planteados en el capítulo anterior, se presenta a continuación el diagrama de flujo del algoritmo propuesto y que ha sido dividido en dos partes: La primera, será llamada etapa de preparación de datos que involucra la recopilación, validación y filtrado de datos con los que se trabajará; la segunda etapa, será la del procesamiento de datos en las que se tendrá como resultado la lista de CCPP elegidos para la expansión de magnetómetros.

Se iniciará con la presentación de todas las variables significativas a utilizar.

- NomCCPP[i]: Es el nombre del Centro Poblado.
- Ubigeo[i]: Código asignado al CCPP por el INEI y que sirve para su identificación rápida.
- Dpto[i]: Departamento en el cual se encuentra el CCPP.
- Prov[i]: Provincia en la cual se encuentra el CCPP.
- Distr[i]: Distrito en el cual se encuentra el CCPP.
- Long_X[i]: Longitud geográfica de la ubicación del CCPP
- Lat_Y[i]: Latitud de la ubicación del CCPP.

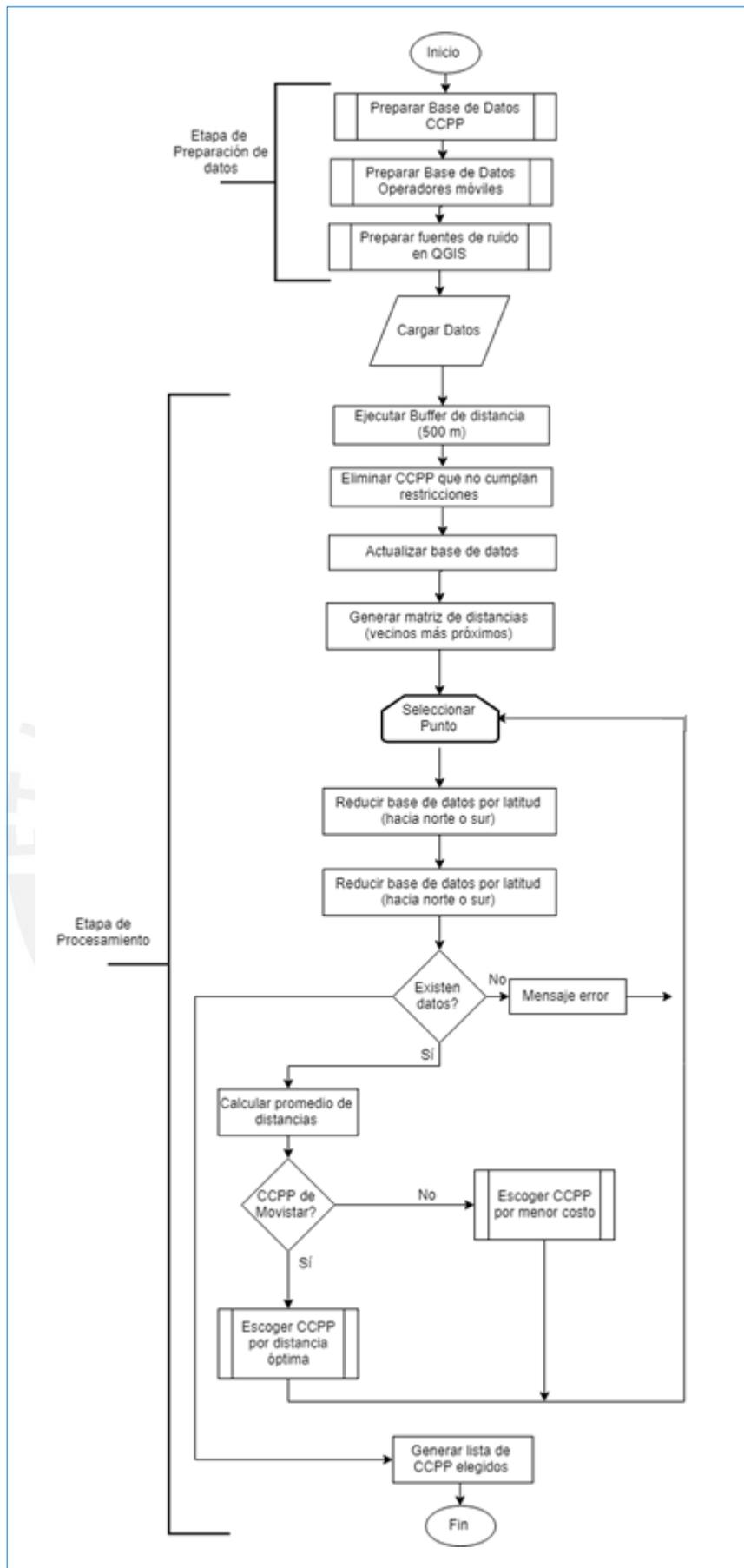


Figura 12: Diagrama de flujo del algoritmo propuesto.

Asimismo, para la elección de un CCPP se deberá tomar en cuenta qué operadores móviles cuentan con cobertura; para eso se tomará en cuenta el precio del mercado de los paquetes de datos móviles post-pago. Un magnetómetro registra y transmite al día un aproximado de 60MB de datos por lo que durante un mes se espera 1,8GB. Por ese motivo y considerando una reserva para casos de emergencia y/o trabajos de mantenimiento se opta por escoger paquetes de datos de 5GB al mes. Es así que según el mercado tenemos:

Tabla II
Paquetes de Operadores Móviles

Operador	Movistar	Claro	Entel	Bitel
Tecnología	3G y 4G	3G y 4G	3G y 4G	3G y 4G
Nombre del Plan	Mi movistar 5GB	Max 39.90	Entel Chip 39.90	Ichip+ 39.90
Paquete de datos	5GB	5GB	5GB	8GB
Costo mensual	S/39.90	S/39.90	S/39.90	S/39.90

Fuente: Páginas web de cada operador móvil.

Es necesario recordar que, por la particularidad de este proyecto, se cuenta con un convenio con el operador móvil Movistar lo cual significa que sus paquetes de datos no tendrán un costo mensual para el proyecto, por lo cual se prioriza su uso. Por otro lado, el resto de operadores móviles tiene un mismo costo mensual por lo que para la elección de uno u otro se tomará en cuenta la distancia mínima que debe existir entre cada magnetómetro. Por lo que los valores de las variables a utilizar en el algoritmo son:

- Movistar = 0
- Claro= 39.90
- Entel = 39.90
- Bitel = 39.90

A continuación, se detallará cada etapa del algoritmo propuesto

3.3 Etapa de preparación de Datos

3.3.1 Preparar Base de datos de Centros Poblados

Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), un Centro Poblado es un lugar del territorio de un distrito que tiene un nombre y es habitado por varias familias o por una sola familia con ánimo de permanencia. Las viviendas de un centro poblado pueden formar manzanas, calles y plazas como; por ejemplo, pueblos o ciudades. Las viviendas también pueden encontrarse semi-dispersas como en el

caso de los caseríos o totalmente dispersas como lo son las viviendas en ámbitos agropecuarios (INEI,2017). En la tabla III, se muestra la distribución por departamento y el número de CCPP en el país.

*Tabla III
Número de Centros Poblados por departamento del Perú.*

Departamento	Centros Poblados	
	Absoluto	%
Total	94922	100.0
Amazonas	3174	3.3
Ancash	7411	7.8
Apurímac	4138	4.4
Arequipa	4727	5.0
Ayacucho	7419	7.8
Cajamarca	6513	6.9
Prov. Const. Del Callao	7	0.0
Cusco	8968	9.4
Huancavelica	6702	7.1
Huánuco	6365	6.7
Ica	1297	1.4
Junín	4530	4.8
La Libertad	3506	3.7
Lambayeque	1469	1.5
Lima	5229	5.5
Loreto	2375	2.5
Madre de Dios	307	0.3
Moquegua	1241	1.3
Pasco	2700	2.8
Piura	2803	3.0
Puno	9372	9.9
San Martín	2510	2.6
Tacna	944	1.0
Tumbes	190	0.2
Ucayali	1025	1.1

Fuente: INEI 2017

De acuerdo con los resultados del Censo Nacional 2017, en el Perú fueron identificados un total de 94922 Centros Poblados (en adelante CCPP). Entre los

departamentos con mayor número de CCPP se encuentran Puno (9,9%), Cusco (9,4%), Ancash (7.8%) y Huancavelica (7.1%) y algunos de los departamentos con menor número de CCPP se encuentran en la costa del país como Callao (0.01%), Lima (0,1%), Tumbes (0,2%) y Tacna (0,2%).

Es en las localidades consideradas como CCPP en los que el proyecto Perú-Magneto ha instalado la mayoría de los magnetómetros, se tiene preferencia por este tipo de zonas ya que, al estar segregadas unas de otras, los niveles de ruido externo que podrían filtrarse en las señales recibidas por los magnetómetros son considerablemente menores frente a locaciones cercanas a ciudades, carreteras con tránsito de vehículos pesados o fábricas. No obstante; como se detalló en el capítulo anterior, adicionalmente de considerar fuentes de ruido, la conexión a internet o cobertura móvil es también indispensable para la instalación de un magnetómetro.

El INEI proporciona, a través de su portal web, una lista de los CCPP del país pero no se incluyen los datos de ubicación geográfica de latitud y longitud, para solucionar esto se realizó un subprograma que identifique y extraiga estos datos de la página web: www.viasatelital.com; en la siguiente figura el diagrama de flujo de dicho subprograma que recorre cada CCPP individualmente.

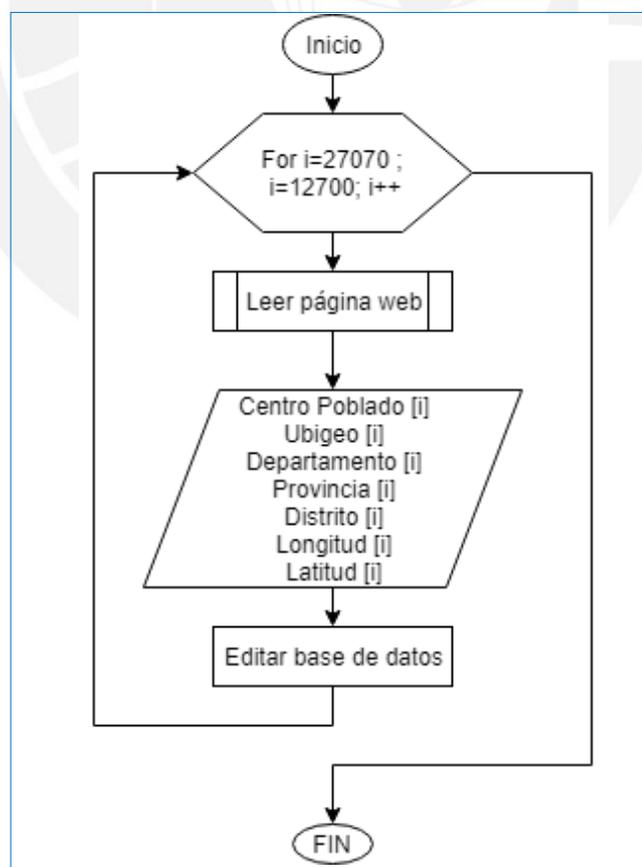


Figura 13: Diagrama de flujo del subprograma "Prepara base de datos CCPP".

Con mayor detalle y como se puede observar en la figura 12, lo que hace el proceso “Leer página web” es capturar todo el texto de una página web, para después analizar línea por línea en busca de los datos solicitados como son: Departamento, Ubigeo, Latitud, Longitud, etc.

De esta manera, se crea una segunda base de datos que se utilizará para agregar los datos de latitud y longitud a la lista oficial del INEI una vez se haya terminado de ejecutar el subprograma.

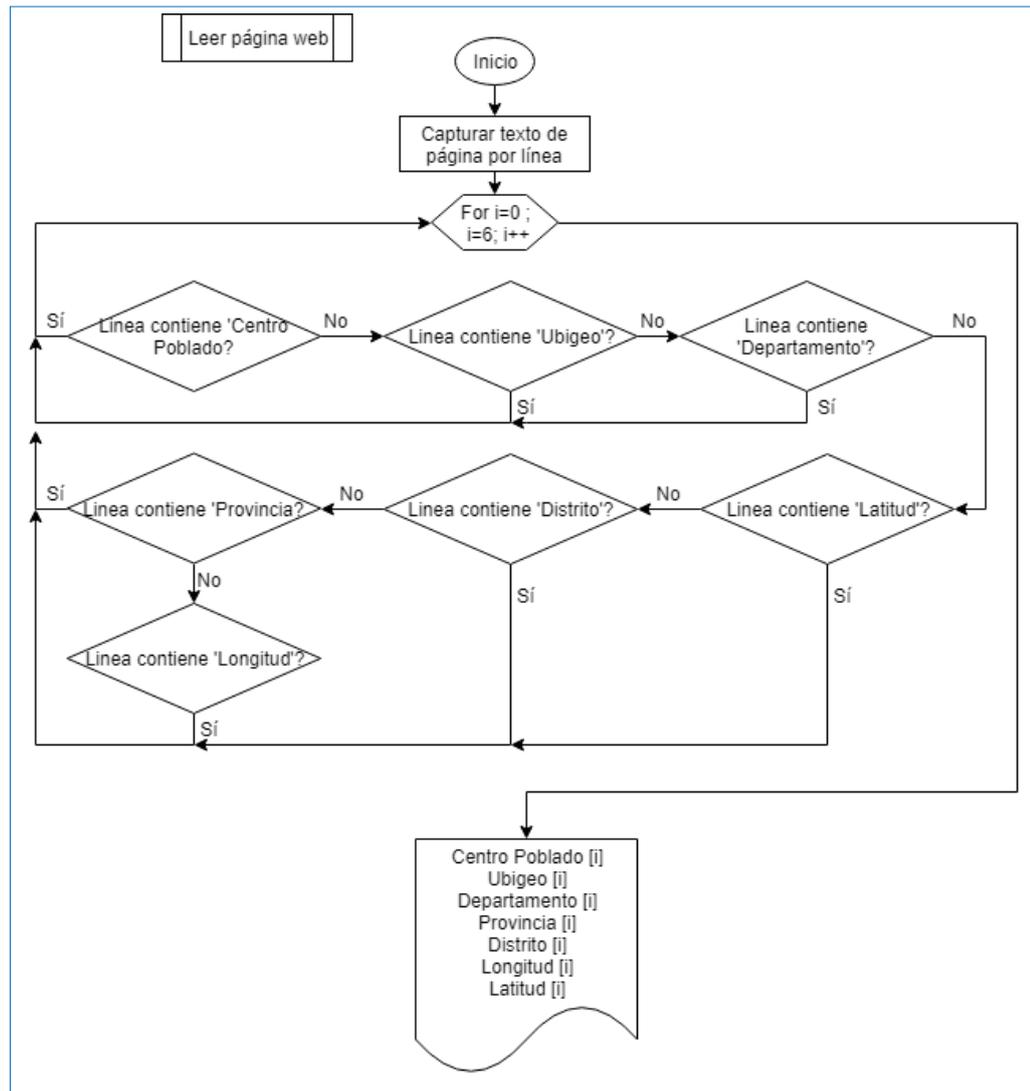


Figura 14: Proceso Leer página web

Una vez que se ha complementado la base de datos del INEI tiene, entre otros datos, el código del CCPP, nombre, distrito, provincia, departamento y los datos de latitud y longitud. Estos son los más relevantes para el desarrollo de esta investigación, en la siguiente tabla se muestra un extracto de cómo los datos son presentados en la base de datos de CCPP del INEI.

Tabla IV
CCPP para el distrito de Sunampe, Chincha-Ica.

ID_CCPP	NOMBRE CENTRO POBLADO	DISTRITO	PROVINCIA	DPTO	LONG_X	LAT_Y
1102100001	SUNAMPE	SUNAMPE	CHINCHA	ICA	-76.1650	-13.4269
1102100005	LA VICTORIA	SUNAMPE	CHINCHA	ICA	-76.1698	-13.4305
1102100006	SANTA CATALINA	SUNAMPE	CHINCHA	ICA	-76.1688	-13.4388
1102100008	SAN FRANCISCO (PAMPA CANELO)	SUNAMPE	CHINCHA	ICA	-76.1677	-13.4461
1102100009	HUACA GRANDE	SUNAMPE	CHINCHA	ICA	-76.1546	-13.4292

Posteriormente, se da inicio al filtrado de datos. En primer lugar, sólo se tomará en cuenta los CCPP de 10 departamentos del Perú, específicamente los departamentos que componen la costa del país. Estos son, de norte a sur:

- Tumbes
- Piura
- Lambayeque
- La Libertad
- Ancash
- Lima
- Ica
- Arequipa
- Moquegua
- Tacna.

Por otro lado, solo se tomarán en cuenta las provincias que limiten con el litoral, el motivo es que en el Perú la zona de subducción o zona donde se produce el choque y/o hundimiento de las placas tectónicas, se encuentra a lo largo de este. Tomando esta consideración se reduce drásticamente el número de CCPP para ser analizados como se muestra en la Tabla VI.

Tabla V
Número de Centros Poblados.

Número de Centros Poblados	
En todo el Perú	94922
En departamentos de la costa del Perú	31527

En las siguientes imágenes, se puede apreciar la reducción de datos a ser procesados por el algoritmo. Para este caso, la base de datos fue introducida en su totalidad al software QGIS para que pueda ser graficada.

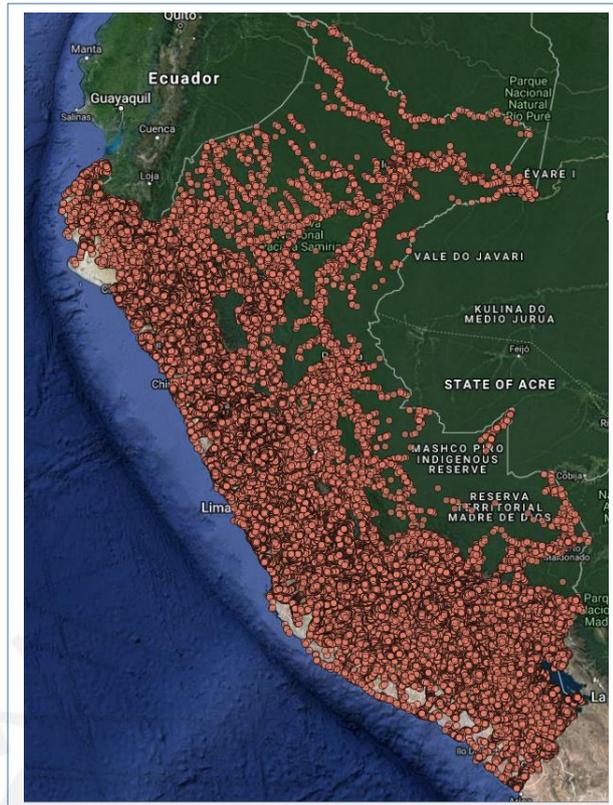


Figura 15: Mapa del Perú con todos los Centros Poblados reconocidos por el INEI.
Fuente: Elaboración propia con base de datos del INEI.



Figura 16: Mapa del Perú con todos los Centros Poblados de departamentos de la costa.
Fuente: Elaboración propia con base de datos del INEI.

3.3.2 Preparar datos de cobertura de internet móvil

En el Perú, los operadores móviles más importantes y de mayor penetración en el mercado son: Movistar, Claro, Entel y Bitel. Cada uno de estos operadores posee una lista de cobertura para los CCPP del país en sus portales web, de ese modo se obtiene la siguiente tabla:

*Tabla VI
Número de CCPP con cobertura móvil 3G y 4G por cada operador móvil*

Operador móvil	Número de CCPP con cobertura 3G en el Perú	Número de CCPP con Cobertura 4G en el Perú
Movistar	10006	4846
Claro	16427	9134
Entel	7532	3283
Bitel	27079	13879

Fuente: Movistar, Claro, Entel y Bitel (2017)

Con cada una de las listas de CCPP con cobertura se armará una nueva base de datos que tiene reducida drásticamente la cantidad de posibles locaciones para un nuevo magnetómetro ya que no todos los CCPP del Perú cuentan con cobertura de internet móvil.

Del mismo modo que con la base de datos del INEI, se trabajará solo con los CCPP en los departamentos de la costa del país, reduciendo aún más la base de datos que será procesada. En la siguiente tabla se puede observar el número total de CCPP por cada operador móvil tanto en tecnología 3G como 4G.

*Tabla VII
CCPP con cobertura 3G y 4G en la costa del país.*

Operador móvil	Número de CCPP con cobertura 3G en la costa	Número de CCPP con Cobertura 4G en la costa
Movistar	3954	1557
Claro	6191	3648
Entel	3527	1823
Bitel	5664	277

Es necesario resaltar que, un CCPP puede tener ambos tipos de tecnología para un mismo operador móvil; por ejemplo, un CCPP puede tener cobertura 3G y 4G de Movistar por lo que los datos de la Tabla 5 no son necesariamente independientes entre sí. En la siguiente figura, se puede observar lo anteriormente explicado. Se

grafican los CCPP que cuentan con cobertura móvil 3G (color morado) y 4G (color amarillo) casi todos los CCPP que cuentan con tecnología 4G por defecto cuentan con tecnología 3G y se encuentran sobrepuestos.



Figura 17: CCPP con cobertura móvil 3G y 4G de Movistar.
Fuente: Elaboración propia con base de datos Movistar.

Como se comentó anteriormente, en un principio se contaba con bases de datos independientes para cada operador móvil, con el fin de trabajar con información válida, cada una de estas bases de datos fue contrastada con la lista oficial de CCPP publicada por el INEI, De este modo se asegura la veracidad de los datos corroborándolos con una lista oficial publicado por un organismo del estado peruano.

Una vez finalizado esto, se unificó una sola base de datos que contiene los CCPP de la costa y sus distintos operadores móviles y tipo de tecnología. En la siguiente figura se muestra un ejemplo para la provincia de Ilo del departamento de Moquegua

ID_CCPP	Departame	Provincia	Distrito	Nombre	LONG_X	LAT_Y	Mov 3G	Mov 4G	Entel 3g	Entel 4G	Bitel 3G	Bitel 4G	Claro 3G
1													
1273	402080032	MOQUEGUA ILO	PACOCHA	LOS OLIVARES	-71.30388	-17.6021	M_3G	#N/A	#N/A	#N/A	B_3G	#N/A	#N/A
1274	1803030007	MOQUEGUA ILO	PACOCHA	LA PASCANA	-71.31108	-17.60813	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	B_3G	#N/A	#N/A
1279	1803020057	MOQUEGUA ILO	EL ALGARROBAL	EL HUESITO	-71.24812	-17.61925	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	B_3G	#N/A	#N/A
1280	1803020040	MOQUEGUA ILO	EL ALGARROBAL	LA COMPAÑIA	-71.27521	-17.62169	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	B_3G	#N/A	#N/A
1281	1803020058	MOQUEGUA ILO	EL ALGARROBAL	BOFEDAL	-71.2651	-17.6225	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	B_3G	#N/A	#N/A
1282	218060044	MOQUEGUA ILO	EL ALGARROBAL	EL ALGARROBAL	-71.270908	-17.623743	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	B_3G	#N/A	#N/A
1283	1803010002	MOQUEGUA ILO	ILO	URUHUASI	-71.33563	-17.62432	M_3G	M_4G	E_3G	E_4G	B_3G	B_4G	C_3G
1284	1401120042	MOQUEGUA ILO	ILO	EL PARRAL	-71.32299	-17.62506	M_3G	#N/A	E_3G	#N/A	B_3G	#N/A	#N/A
1285	1803020062	MOQUEGUA ILO	EL ALGARROBAL	EL MAJUELO DE SAN	-71.29826	-17.62513	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	B_3G	#N/A	#N/A
1286	215080073	MOQUEGUA ILO	EL ALGARROBAL	SANTO DOMINGO	-71.29343	-17.6252	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	B_3G	#N/A	#N/A
1292	1803010006	MOQUEGUA ILO	ILO	CATACATA	-71.37024	-17.68236	M_3G	M_4G	E_3G	E_4G	#N/A	#N/A	C_3G
1293	1803010009	MOQUEGUA ILO	ILO	CUARTEL PISAGUA	-71.37436	-17.70285	M_3G	#N/A	E_3G	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A

Figura 18: Cobertura en CCPP de la provincia de Ilo, Moquegua

3.3.3 Preparar fuentes de Ruido Mecánico y Eléctrico

Para este apartado se considerará como una de las mayores fuentes de ruido mecánico la Red Vial Nacional, específicamente, las carreteras longitudinales, carreteras de penetración y carreteras de enlace. Son estas por las que circulan la mayoría de vehículos pesados durante todo el día, las vías rurales y vecinales no serán tomadas en cuenta. Por otro lado, en cuando al ruido eléctrico, la fuente serán las líneas de transmisión de alto voltaje que están a lo largo de todo el Perú.



Figura 19: Red Vial Nacional. Fuente: MTC



Figura 20: Líneas de alta tensión en el Perú. Fuente: OSINERGMIN

Finalmente, para las fuentes de ruido solo se tomará en cuenta su extensión a lo largo de la costa del país. Si bien estos no son parte de una base de datos, se simplifica su extensión para minimizar el tiempo en el que el software QGIS procesa datos.

3.4 Etapa de procesamiento de datos

Finalizada la preparación y tratamiento de los datos, y siguiendo con la ejecución del algoritmo, es momento de trabajarlos para lograr los objetivos de esta tesis.

3.4.1 Buffer de distancia

En primer lugar, se afrontará las restricciones en las que se indica que un magnetómetro debe de estar alejado 500 metros de una fuente de ruido como lo son carreteras y líneas de alta tensión. Es así que, mediante el software QGIS y una de sus muchas aplicaciones, se realizará un análisis espacial vectorial, específicamente un *buffer*. Un *buffer* genera dos áreas: un área que está dentro de una distancia especificada a entidades del mundo real seleccionadas y otra área que está fuera; el área que está dentro de la distancia especificada es la *zona buffer* (Mandel et. Al.,2016).

Se creará un *buffer* de 500 m alrededor de las carreteras y líneas de alta tensión. La finalidad de esta acción es identificar los CCPP que se encuentren dentro del buffer creado, estos CCPP no podrían ser sitios idóneos para la instalación de un magnetómetro por su cercana ubicación a estas fuentes de ruido. En las siguientes imágenes se describirá, con algunos ejemplos, el proceso paso a paso.

Inicialmente, y como parte de este ejemplo, se muestra una zona que comprende el distrito de Huaral, Aucallama y Chancay. En esta zona están representados los CCPP por los diversos puntos multicolores; por otro lado, las líneas de alta tensión son de color rojo y la carretera esta resaltada en color amarillo como se aprecia en la figura 19.

A continuación, se ejecutará la herramienta *buffer*, generando un área de 500 metros alrededor de las líneas de transmisión y las carreteras. El resultado se muestra en la figura 20. Entonces, todos los CCPP que se ubiquen dentro de la zona *buffer* son considerados como sitios con influencia de ruido mecánico y eléctrico y no serán considerados como sitios idóneos para la instalación de un magnetómetro.



Figura 21: CCPP en distritos de Huaral, Aucallama y Chancay.



Figura 22: Buffer creado alrededor de líneas de transmisión y carreteras.

Una de las razones para delimitar las líneas de alta tensión y las carreteras a solamente los departamentos de la costa fue optimizar el tiempo de procesamiento de la herramienta buffer. Para graficar el área de 500 metros alrededor se tomó un tiempo de procesamiento de aproximadamente 03 minutos, tiempo que sería mayor si se dibuja el área en el resto de departamentos del Perú en los que los CCPP no son tomados en cuenta.

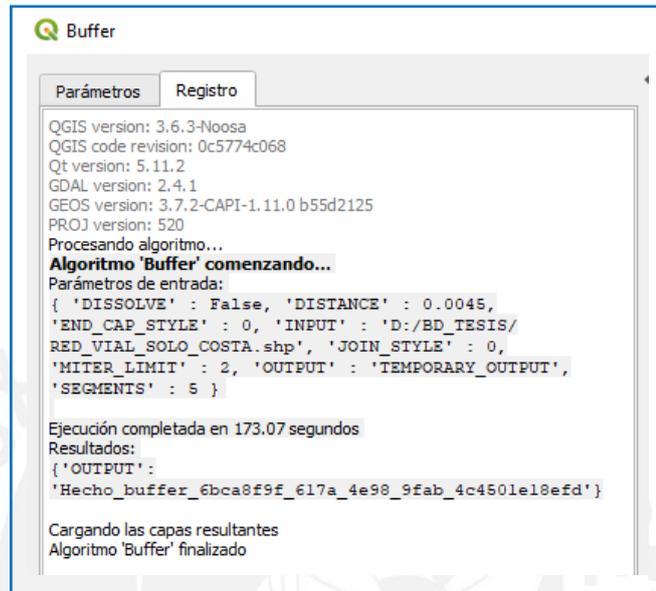


Figura 23: Tiempo de procesamiento empleando en realizar el buffer de distancia.

Una vez finalizado el uso de la herramienta de buffer a lo largo de toda la costa del país, la base de datos de CCPP se reduce a solamente 3054 posibles lugares para la instalación de un magnetómetro; estos CCPP tienen cobertura de uno o más operadores móviles. De este modo, se asegura que la restricción sobre fuentes de ruido siempre se cumpla.

El siguiente paso es utilizar otra herramienta del QGIS; específicamente la matriz de distancias. Esta herramienta permite conocer, según indicaciones del usuario, a los “n” vecinos más próximos de cualquier punto geográfico. Para el algoritmo se seleccionaron los 250 vecinos más próximos obteniendo resultados de distancias mayores a 100 km, esto indica que la restricción de seleccionar magnetómetros a distancias entre 45 km y 90 km puede cumplirse a partir de cualquier CCPP.

3.4.2 Selección de CCPP

La siguiente tarea es comenzar a seleccionar los CCPP, para simplificar el proceso se dividió su desarrollo en dos iteraciones: la primera es ubicar los posibles sitios hacia el norte del país comenzando por la estación PM-07 “Aucallama” previamente instalada. Una vez concluida esta primera iteración, se comenzará a hacer lo mismo para la zona sur del país, comenzando desde la estación PM-12 “Pucusana” en

adelante y respetando las otras estaciones del proyecto ya instaladas y en funcionamiento.

3.4.2.1 Primera iteración

Como se mencionó anteriormente, se comenzará a escoger los posibles sitios de instalación hacia el norte desde la estación PM-07 Aucallama, para esto se tomará su ubicación geográfica y, en conjunto con la base de datos y la matriz de distancias, se buscarán todos los CCPP que se encuentren hacia el norte. Para lograr este primer paso, se utilizan las coordenadas geográficas de la estación que son:

Tabla VIII
Coordenadas geográficas de la estación PM-07 Aucallama.

Nombre	Longitud	Latitud
PM07_Aucallama	-77.1788342	-11.5824952

Para este caso inicial, se buscará en la base de datos de CCPP aquellos cuya latitud sea menor a la de la estación o CCPP por el cual se quiere empezar. Vale aclarar que a medida que nos acercamos a la línea ecuatorial, la latitud de un punto geográfico tiende a ser cero; por ese motivo, se busca latitudes menores a la del punto de partida ya que, de ese modo nos aseguramos que nos dirigimos hacia el norte. En cuanto a la longitud, no representa un mayor problema porque se está trabajando con provincias que tienen litoral costero.

Continuando con el ejemplo de la estación de Aucallama, la base de datos solamente mostrará los CCPP que se encuentren al norte de esta estación. Posteriormente, se reducirá aún más la búsqueda aplicando la restricción de distancia para que solamente se tome en cuenta aquellos CCPP que se ubiquen en un radio entre 45 km. y 90 km. de distancia del punto seleccionado.

El siguiente paso en el algoritmo, es verificar que existan CCPP con las especificaciones requeridas. Puede darse el caso de que existan zonas sin cobertura en el radio de 45 km. a 90 km. en ese caso particular, se deberá escoger manualmente la próxima ubicación más cercana. En la figura 19, se puede ver parte de la base de datos con los CCPP que cumplen la distancia requerida a la estación PM-07 Aucallama y sus operadores móviles.

InputID	TargetID	Distancia km	LONG_X	LAT_Y	Dpto	Prov	Distrito	NOMBRE CENTRO POBLADO	M_3G	M_4G	E_3G	E_4G	B_3G	B_4G	C_3G	
PM07	3538	45.07076921	-77.36533	-11.22182	LIMA	HUAURA	SAYAN	CAFETALES	#N/D	C_3G						
PM07	3573	45.15239377	-77.40133	-11.24196	LIMA	HUAURA	SAYAN	JUAN PABLO	M_3G	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	C_3G
PM07	3584	45.19329904	-77.36656	-11.22071	LIMA	HUAURA	SAYAN	LA POLVORA	#N/D	C_3G						
PM07	3570	45.3752266	-77.3972	-11.23692	LIMA	HUAURA	SAYAN	HARAS MORENO	M_3G	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	C_3G
PM07	3594	45.38467349	-77.40954	-11.24493	LIMA	HUAURA	SAYAN	LOS CERROS	M_3G	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	C_3G
PM07	3589	45.47988517	-77.36301	-11.21649	LIMA	HUAURA	SAYAN	LAS GARDENIAS	#N/D	C_3G						
PM07	3592	45.52056568	-77.40749	-11.24206	LIMA	HUAURA	SAYAN	LAS PIEDRAS	M_3G	#N/D	E_3G	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
PM07	3565	45.66717262	-77.39973	-11.23541	LIMA	HUAURA	SAYAN	FUNDO ROMAN	M_3G	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	C_3G
PM07	3623	45.84102651	-77.37484	-11.21899	LIMA	HUAURA	SAYAN	SANTA VICTORIA	M_3G	#N/D						
PM07	3549	46.2274209	-77.42879	-11.24938	LIMA	HUAURA	SAYAN	COCO RICO	#N/D	C_3G						
PM07	3564	46.23328775	-77.40083	-11.23007	LIMA	HUAURA	SAYAN	FUNDO EL MILAGRO	M_3G	#N/D	E_3G	E_4G	#N/D	#N/D	#N/D	C_3G
PM07	3620	46.31838045	-77.38558	-11.22003	LIMA	HUAURA	SAYAN	SANTA ANA	M_3G	#N/D	E_3G	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
PM07	3622	46.50810986	-77.37189	-11.21063	LIMA	HUAURA	SAYAN	SANTA ROSITA	M_3G	#N/D	E_3G	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
PM07	3618	46.8753966	-77.37997	-11.21117	LIMA	HUAURA	SAYAN	SAN MIGUEL BAJO	M_3G	#N/D	E_3G	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	C_3G
PM07	3619	46.90631836	-77.37083	-11.20605	LIMA	HUAURA	SAYAN	SAN ROBERTO	M_3G	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	C_3G
PM07	3552	47.37371195	-77.24223	-11.16044	LIMA	HUAURA	SAYAN	DIECISIETE DE ENERO	#N/D	C_3G						
PM07	3559	47.50837083	-77.39065	-11.21058	LIMA	HUAURA	SAYAN	EL DORADO	M_3G	#N/D	E_3G	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	C_3G
PM07	3626	47.62223572	-77.3768	-11.20187	LIMA	HUAURA	SAYAN	VILLA VICTORIA	M_3G	#N/D	E_3G	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	C_3G
PM07	3553	47.86147593	-77.38825	-11.20558	LIMA	HUAURA	SAYAN	DOBLE B	M_3G	#N/D	E_3G	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	C_3G
PM07	3612	47.93774316	-77.39097	-11.20631	LIMA	HUAURA	SAYAN	SAN CARLOS	M_3G	#N/D	E_3G	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
PM07	3614	47.9877697	-77.40482	-11.21394	LIMA	HUAURA	SAYAN	SAN GUILLERMO	M_3G	#N/D	E_3G	E_4G	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
PM07	3542	48.09238798	-77.39856	-11.20908	LIMA	HUAURA	SAYAN	CAROLINA	M_3G	#N/D	E_3G	E_4G	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
PM07	3536	48.21457716	-77.41848	-11.22022	LIMA	HUAURA	SAYAN	AGRAVES	M_3G	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	C_3G
PM07	3593	48.33012556	-77.42304	-11.22202	LIMA	HUAURA	SAYAN	LOS ANDES	M_3G	#N/D	E_3G	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
PM07	3580	48.34672288	-77.19656	-11.1473	LIMA	HUAURA	SAYAN	LA HOYADA	M_3G	#N/D	E_3G	E_4G	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
PM07	3577	48.37278951	-77.2237	-11.14902	LIMA	HUAURA	SAYAN	LA CRUZ DE ANDAHUASI	M_3G	#N/D	E_3G	E_4G	#N/D	#N/D	#N/D	C_3G
PM07	3579	48.53356102	-77.40554	-11.20862	LIMA	HUAURA	SAYAN	LA ESTRELLA	M_3G	#N/D	E_3G	E_4G	#N/D	#N/D	#N/D	C_3G
PM07	3605	48.67527761	-77.20308	-11.14465	LIMA	HUAURA	SAYAN	PUENTE CHICO	M_3G	#N/D	E_3G	E_4G	#N/D	#N/D	#N/D	C_3G
PM07	3575	48.69220261	-77.40795	-11.20842	LIMA	HUAURA	SAYAN	LA CADENA	M_3G	#N/D	E_3G	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	C_3G
PM07	3617	48.74162321	-77.40913	-11.20862	LIMA	HUAURA	SAYAN	SAN MIGUEL	M_3G	#N/D						

Figura 24: CCPP ubicados entre 45km y 90km de la estación PM-07 Aucallama.

Gráficamente las acciones antes descritas se resumen en la figura 20, en donde en la esquina inferior derecha, se tiene de color amarillo la estación PM-07 Aucallama, desde ella se dibuja un radio de 90 km. a la redonda y se resaltan solo los CCPP que se encuentran a partir de 45 km.

Una vez realizada esta primera selección de CCPP se pasará a elegir el más idóneo para la instalación de un magnetómetro. En esta fase del algoritmo entra a tallar qué operador móvil es el más conveniente, pues como se explicó anteriormente, el operador móvil Movistar no representa un costo mensual para este proyecto y por ese motivo se prefiere su uso sobre los demás operadores.

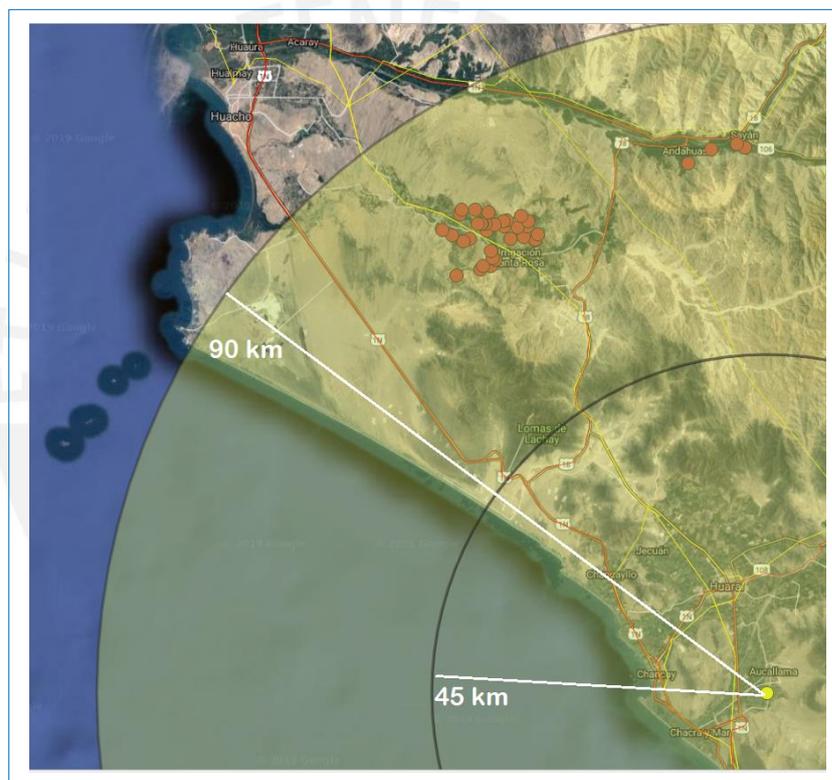


Figura 25: CCPP ubicados entre 45km y 90km.

Para seleccionar el sitio más idóneo entre la lista de posibles sitios se realiza un promedio entre todas las distancias de los CCPP al punto inicial, en este ejemplo la estación Aucallama, y se seleccionará el CCPP que se acerque al promedio de distancia, teniendo como prioridad el CCPP que represente el menor costo mensual para el proyecto. Continuando con el ejemplo, el CCPP seleccionado para el posible sitio de instalación es:

Tabla IX
Ejemplo de CCPP escogido.

Datos de CCPP	
Departamento	LIMA
Provincia	HUARA
Distrito	SAYAN
Nombre CCPP	UNION IZQUIERDA
Operador	MOVI 3G
LAT_Y	-77.43231
LONG_X	-11.21775
Dist. Km	49.3031277

De este modo se seleccionan los posibles puntos de instalación de los magnetómetros, repitiendo estos pasos hasta llegar al departamento de Tumbes.

3.4.2.2 Segunda iteración

Al igual que la primera etapa, la segunda etapa comprende los mismos pasos para la selección de los CCPP idóneos, el único cambio es que, para dirigir la expansión hacia el sur, se buscan CCPP con latitud mayor a la del punto inicial.

3.5 Resultados

Como resultados de la ejecución total del algoritmo se obtuvo que, para cubrir toda la costa del Perú, se necesitan instalar 24 magnetómetros adicionales a los 10 que componen la red actualmente, componiendo la red final después de la expansión un total de 34 magnetómetros.

Tabla X
Resumen de la expansión priorizando costos.

Resumen de la expansión de la Red Perú-Magneto	
Magnetómetros instalados	10
CCPP elegidos	24
Total	34

En la siguiente figura se observa la costa del país con lo que sería las posibles zonas de instalación de los magnetómetros.



Figura 26: Posible expansión de la Red Perú-Magneto.

En la siguiente tabla, se tiene al detalle cada una de los CCPP seleccionados, así como la distancia entre ellos.

Tabla XI
Lista de CCPP elegidos para la expansión de la Red Perú-Magneto.

Inpu tID	Targ etID	Distanci a km	LON G_X	LAT _Y	DPTO	Prov	Distrito	NOMBRE CENTRO POBLADO	Movi 3G	Movi 4G	Entel 3G	Entel 4G	Bitel 3G	Bitel 4G	Claro 3G
4488	4758	84.96	-80.48	-3.71	TUMBES	TUMBES	SAN JACINTO	ALGARROBILLO	M_3 G	#N/A	E_3 G	#N/A	B_3 G	#N/A	#N/A
4501	4488	45.19	-81.11	-4.15	PIURA	TALARA	LOS ORGAN OS	PUERTO ANTIGUO PLAYA	M_3 G	#N/A	E_3 G	E_4 G	#N/A	#N/A	C_3 G
4045	4501	48.63	-81.27	-4.52	PIURA	TALARA	PARIÑAS	PIEDRITAS	M_3 G	M_4 G	E_3 G	#N/A	B_3 G	#N/A	#N/A
4211	4045	45.13	-81.06	-4.91	PIURA	PAITA	COLAN	SAN LUCAS (PUEBLO NUEVO DE COLAN)	M_3 G	M_4 G	E_3 G	E_4 G	B_3 G	#N/A	C_3 G
4352	4211	49.50	-80.67	-5.03	PIURA	PIURA	PIURA	JUAN PABLO II	M_3 G	#N/A	E_3 G	#N/A	B_3 G	#N/A	#N/A
1935	2518	47.54	-79.91	-6.64	LAMBAY EQUE	LAMBAY EQUE	LAMBAY EQUE	PUNTO NUEVE EL ARBUSTO	M_3 G	M_4 G	E_3 G	#N/A	B_3 G	#N/A	C_3 G
1670	1935	60.93	-79.57	-6.91	LAMBAY EQUE	CHICLAY O	CAYALTI	CHACARILLA	M_3 G	#N/A	E_3 G	#N/A	B_3 G	#N/A	#N/A
1417	1670	54.22	-79.52	-7.46	LA LIBERTA D	PACASM AYO	SAN PEDRO DE LLO	BUENOS AIRES	M_3 G	#N/A	E_3 G	#N/A	B_3 G	#N/A	#N/A
1760	1417	45.67	-79.31	-7.90	LA LIBERTA D	ASCOPE	MAGDAL ENA DE C	LA GRAMA (EL PICA)	M_3 G	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
1859	1760	55.17	-79.01	-8.18	LA LIBERTA D	TRUJILL O	MOCHE	HUARTACO	M_3 G	M_4 G	E_3 G	E_4 G	B_3 G	#N/A	#N/A
114	1859	55.51	-78.70	-8.57	LA LIBERTA D	VIRU	CHAO	SAN ALBERTO	M_3 G	#N/A	E_3 G	E_4 G	B_3 G	#N/A	#N/A
10	114	61.09	-78.57	-9.05	ANCASH	SANTA	CHIMBO TE	MONTE CHIMBOTE	M_3 G	#N/A	E_3 G	#N/A	B_3 G	#N/A	#N/A

65	10	65.08	-78.26	-9.50	ANCASH	CASMA	CASMA	CASMA ALTA	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	B_3 G	#N/A	#N/A
2902	65	93.40	-78.11	-	ANCASH	HUARME Y	HUARME Y	CUZCUZ	M_3 G	#N/A	#N/A	#N/A	B_3 G	#N/A	C_3 G
3625	2902	54.47	-77.71	-	LIMA	BARRAN CA	SUPE	SANTA ROSA	M_3 G	M_4 G	E_3 G	E_4 G	B_3 G	#N/A	#N/A
PM0 7	3625	49.30	-77.43	-	LIMA	HUAURA	SAYAN	UNION IZQUIERDA	M_3 G	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	C_3 G
PM1 2	3015	58.33	-76.50	-	LIMA	CAÑETE	CERRO AZUL	PLAYA CHECONDE	M_3 G	M_4 G	E_3 G	E_4 G	#N/A	#N/A	C_3 G
3015	619	61.74	-76.17	-	ICA	CHINCH A	GROCIO PRADO	ROTONDO	M_3 G	#N/A	E_3 G	#N/A	B_3 G	#N/A	#N/A
619	PM08	48.33	-76.12	-	ICA	PISCO	PISCO	PM08_Pisco	M_3 G	0	0	0	0	0	0
PM1 0	1122	71.43	-75.11	-	ICA	NAZCA	EL INGENIO	ESTUDIANTE	#N/A	#N/A	E_3 G	#N/A	B_3 G	#N/A	C_3 G
1122	1141	78.98	-75.19	-	ICA	NAZCA	MARCO NA	LA GUANERA	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	C_3 G
1141	356	61.58	-74.64	-	AREQUI PA	CARAVE LI	BELLA UNION	LA CAPILLA	M_3 G	#N/A	#N/A	#N/A	B_3 G	#N/A	#N/A
356	350	48.15	-74.39	-	AREQUI PA	CARAVE LI	ATIQUIP A	SILACA	M_3 G	M_4 G	E_3 G	E_4 G	#N/A	#N/A	C_3 G
350	335	97.69	-73.63	-	AREQUI PA	CARAVE LI	ATICO	ATICO	M_3 G	M_4 G	E_3 G	#N/A	B_3 G	#N/A	#N/A
335	289	63.54	-73.11	-	AREQUI PA	CAMANA	OCOÑA	PEDREGAL	M_3 G	#N/A	E_3 G	E_4 G	B_3 G	#N/A	C_3 G
289	304	50.41	-72.70	-	AREQUI PA	CAMANA	SAMUEL PASTOR	EL CHORRO	M_3 G	M_4 G	E_3 G	#N/A	B_3 G	#N/A	C_3 G
304	452	89.35	-72.00	-	AREQUI PA	ISLAY	MOLLEN DO	ALBATROS	M_3 G	M_4 G	E_3 G	#N/A	B_3 G	#N/A	C_3 G

452	PM04	111.50	-70.98	-	17.24	MOQUE GUA	MOQUE GUA	MOQUE GUA	PM04_Moquegua	M_3 G	0	0	0	0	0	0
PM0 4	PM05	74.11	-70.97	-	17.88	TACNA	TACNA	ITE	PM05_Ite	M_3 G	0	0	0	0	0	0
PM0 5	PM03	84.58	-70.21	-	17.99	TACNA	TACNA	POCOL LAY	PM03_Pocollay	M_3 G	0	0	0	0	0	0
PM0 3	PM02	38.73	-70.41	-	18.27	TACNA	TACNA	LOS PALOS	PM02_Tacna	M_3 G	0	0	0	0	0	0



3.5.1 Análisis de los resultados

A continuación, se realizará el análisis de los resultados obtenidos. En la siguiente tabla se muestran los datos estadísticos. De estos resalta el promedio de distancia entre cada CCPP y también los valores mínimos y máximos, estos se deben a que ya existen magnetómetros instalados con esas distancias.

Tabla XII
Estadística de la expansión de la Red Perú-Magneto

Datos estadísticos	
Promedio	63.04 Km.
Error típico	3.248
Mediana	58.332 Km.
Desviación estándar	18.08 Km.
Varianza de la muestra	327.104
Curtosis	0.393
Coefficiente de asimetría	1.050
Mínimo	38.727 Km.
Máximo	111.5 Km.

Por otro lado, en la siguiente figura se muestra la distribución de todos los CCPP elegidos, así como los magnetómetros ya instalados. Como se mencionó anteriormente los valores atípicos y que no cumplen con la restricción de distancia se debe a que existen magnetómetros ya instalados o porque hay zonas sin cobertura en las que se debió elegir el CCPP más cercano, esto ocurrió específicamente en los departamentos de Piura, Ica y Moquegua.

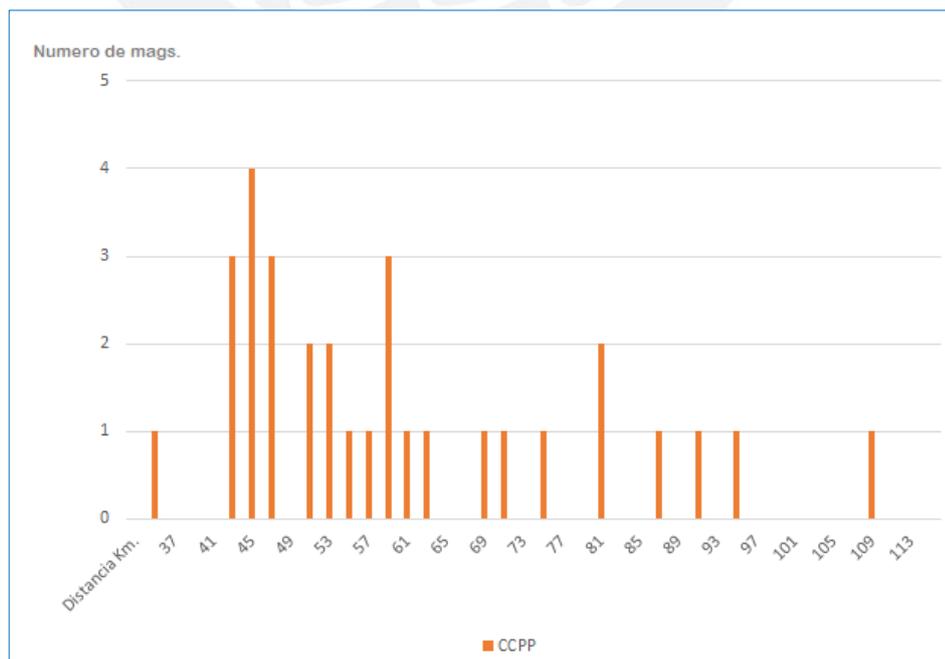


Figura 27: Distribución de CCPP final.

En cuanto al área de cobertura conseguida con los 34 magnetómetros, se tomará en cuenta un rango de sensibilidad de 60 km. similar al promedio de distancias. En la siguiente figura se puede observar el área de cobertura de los magnetómetros.

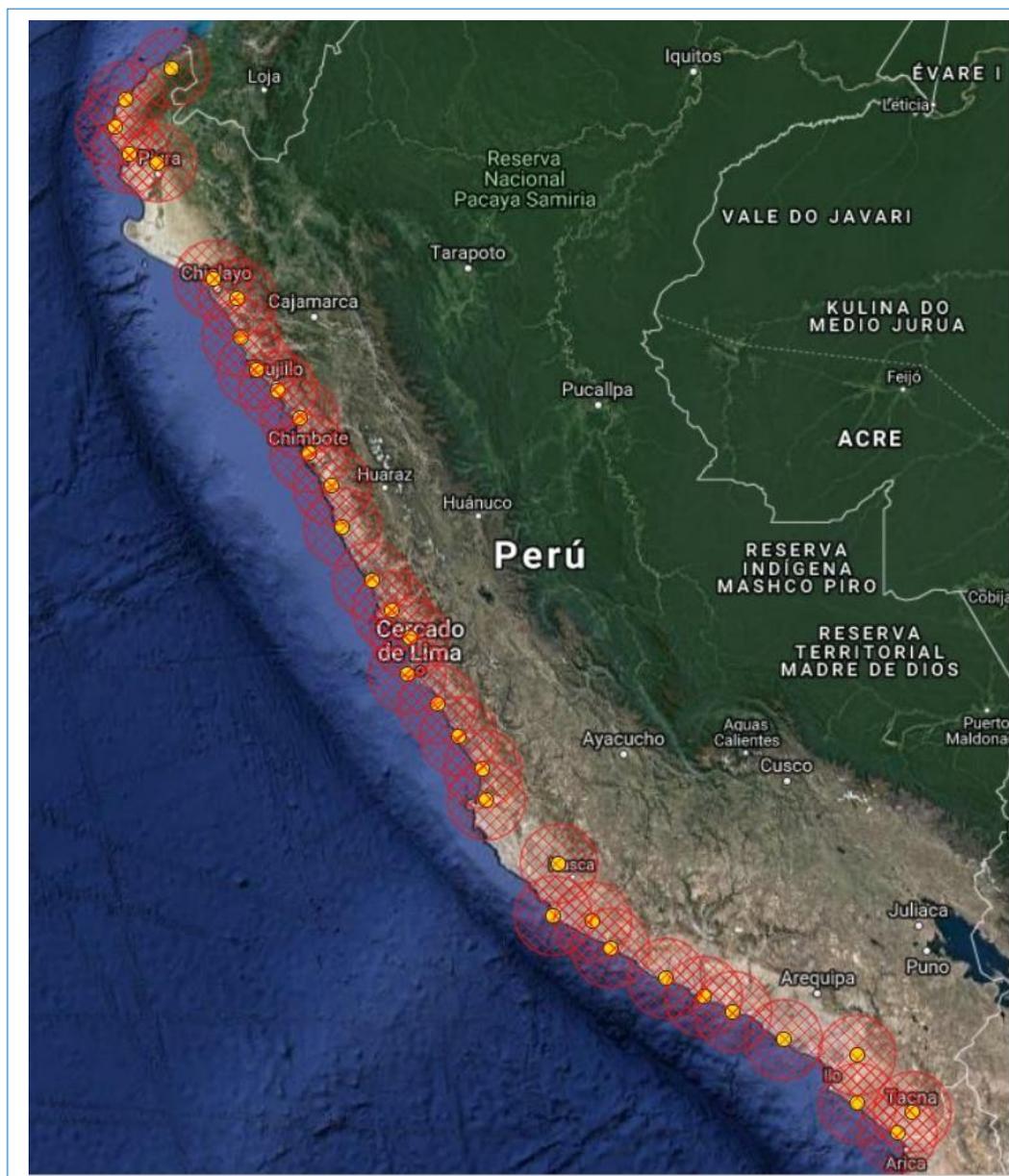


Figura 28: Cobertura de los magnetómetros con 60 km. de radio.

Si se considera individualmente cada magnetómetro el área total de cobertura es de $350,602.56 \text{ km}^2$; sin embargo, los magnetómetros intersecan su área de sensibilidad y es así que el área total de cobertura es de $250,586.36 \text{ km}^2$.

Finalmente, el análisis o impacto económico que tendría esta expansión de la red en particular se muestra en la siguiente tabla:

Tabla XIII
Costo fijo mensual de la expansión de la Red Perú-Magneto.

Operadores	Movistar	Claro	Bitel	Entel
Número de Magnetómetros	32	1	1	0
Precio	S/ 0.00	S/ 39.90	S/ 39.90	S/ 39.90
Costo total por mes	S/ 79.80			

Según los datos de la tabla 12, el costo fijo para la transmisión de los datos de los magnetómetros es un total de S/ 957.60 por año, fuera de gastos de mantenimiento de equipos, repuestos, etc. Este costo sería el menor posible utilizando las restricciones propuestas en el apartado 3.2 de esta tesis.

3.5.2 Segunda ejecución del algoritmo

Una vez finalizada la ejecución del algoritmo y el análisis de resultados, es conveniente tener en cuenta algunas consideraciones. Si bien el algoritmo ubica los posibles CCPP que son adecuados para la instalación de un magnetómetro, se ha priorizado el minimizar los costos de conexión a internet de la red; existe también un factor que es la intersección de las áreas de sensibilidad de los magnetómetros y que facilita la triangulación de pulsos electromagnéticos, aspecto fundamental en la investigación del proyecto Perú-Magneto.

Para propiciar la triangulación de pulsos, los magnetómetros deberían estar a una distancia menor unos de otros, independientemente de su rango de sensibilidad aproximado de 60 km. Por ese motivo, se realizó una nueva ejecución del algoritmo utilizando las mismas restricciones hacia las fuentes de ruido, pero con la particularidad de que los CCPP fueron escogidos por un usuario que ha participado en instalaciones de magnetómetros y tiene el conocimiento sobre cuales zonas podrían ser las más idóneas para un magnetómetro.

Para este caso, el uso del operador móvil Movistar ha sido priorizado en los casos en los que el CCPP cuenta con su cobertura; sin embargo, con el fin de priorizar la triangulación de pulsos, si una zona idónea no contaba con dicha cobertura se selecciona otro operador.

Es así que al terminar de ejecutar el algoritmo se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla XIV
Resumen de la expansión priorizando la triangulación de pulsos.

Resumen de la expansión de la Red Perú-Magneto	
Magnetómetros instalados	10
CCPP elegidos	61
Total	71

En la siguiente figura se observa todas las posibles zonas de instalación de un magnetómetro de acuerdo con la última ejecución del algoritmo.



Figura 29: Expansión de la Red Perú-Magneto priorizando la triangulación de pulsos.

3.5.3 Análisis de Resultados

Tabla XV
Datos estadísticos de la segunda ejecución del algoritmo.

Datos estadísticos	
Promedio	35.832 Km.
Error típico	3.11
Mediana	25.912 Km.
Desviación estándar	26.754 km.
Varianza de la muestra	715.78
Curtosis	5.832
Coefficiente de asimetría	2.28
Mínimo	10.547 Km.
Máximo	146.23 Km.

En esta ocasión, el promedio de distancia entre CCPP se redujo en, aproximadamente, 42 % siendo 35,8 Km. Por otro lado, la distancia mínima es 10.5 Km. lo que confirma la priorización de la triangulación de pulsos.

En la siguiente figura se aprecia la distribución de todos los magnetómetros, nuevamente los valores alejados se dan por las zonas en las que no existe cobertura móvil o porque los CCPP existentes no cumplen con las restricciones de ruido.

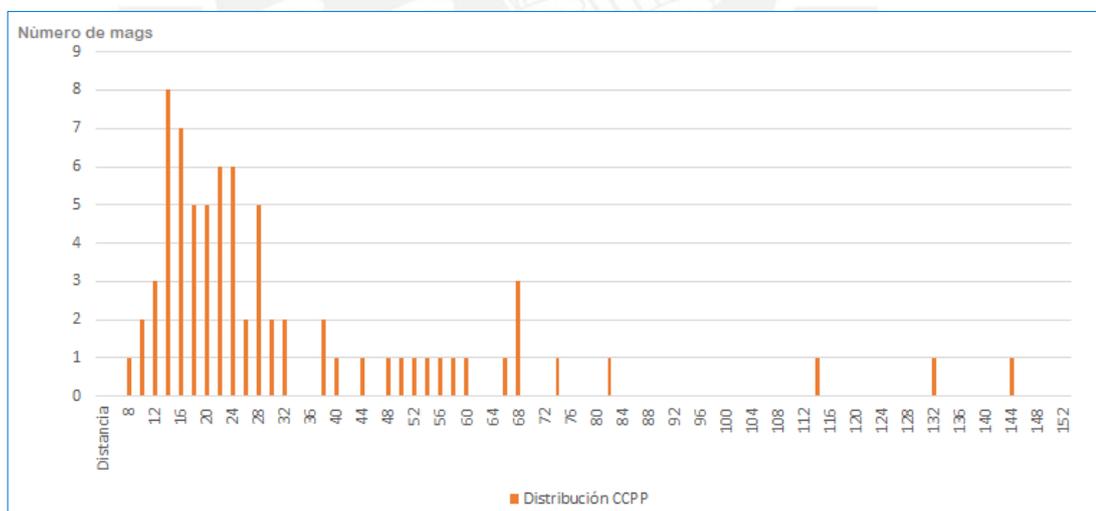


Figura 30: Distribución de CCPP priorizando la triangulación de pulsos.

Si se considera cada magnetómetro individualmente, con los 71 que componen esta nueva configuración de la red, el área total de cobertura sería de $802,992.96 \text{ km}^2$. Por otro lado, el área de intersección de magnetómetros sería de $274,812.311 \text{ km}^2$.

A continuación, se podrá apreciar las nuevas zonas de cobertura a lo largo de toda la costa del país. En la figura 27 se tiene la Red Perú-Magneto completa y posteriormente, en la figura 28, un acercamiento a la zona del departamento de Lima en donde se concentra la mayor cantidad de CCPP escogidos y se puede ver a mayor detalle la intersección de los radios de sensibilidad de los magnetómetros. Esto se debe a que el área de Lima se encuentra largo tiempo en un silencio sísmico y es una zona de gran importancia para el proyecto Perú-Magneto

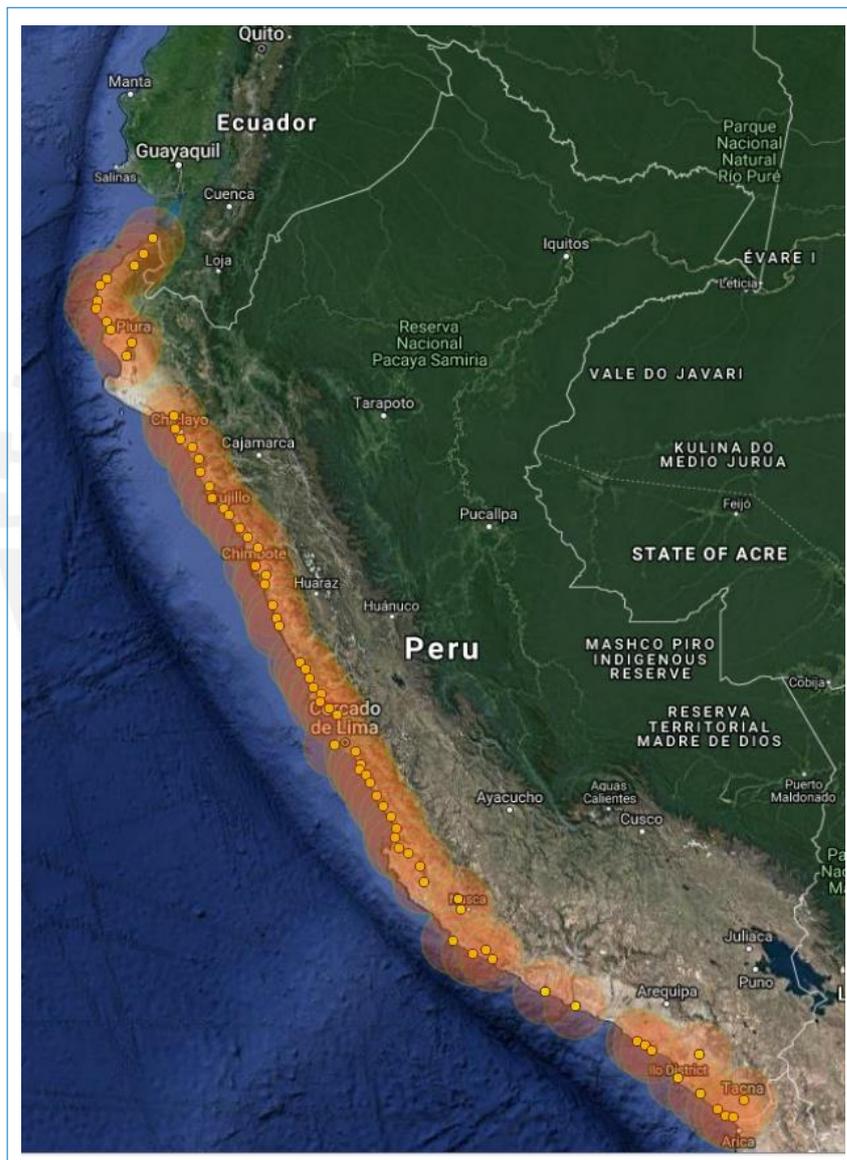


Figura 31: Segunda opción de ampliación de la Red Perú-Magneto.

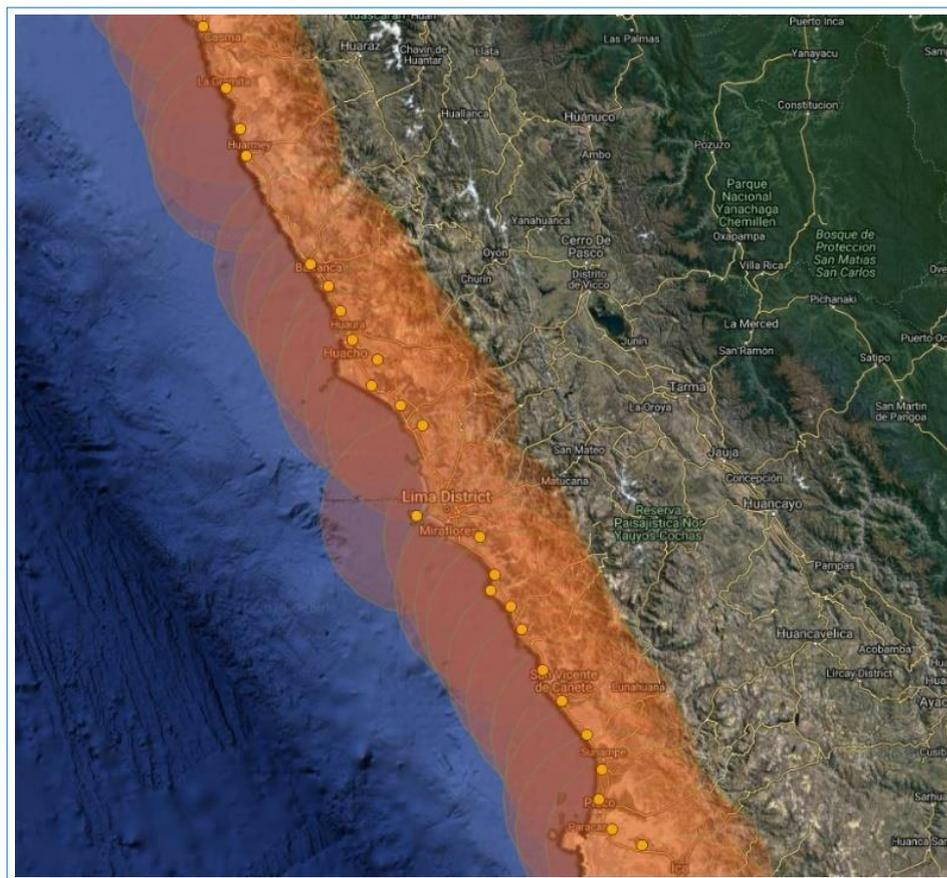


Figura 32: Área del departamento de Lima.

Finalmente, el análisis económico para esta configuración se resume en la siguiente tabla:

Tabla XVI
Costo fijo mensual de la Red Perú-Magneto.

Operadores	Movistar	Claro	Bitel	Entel
Número de Magnetómetros	51	13	3	3
Precio	S/ 0.00	S/ 39.90	S/ 39.90	S/ 39.90
Costo total por mes	S/ 758.10			

De acuerdo con los datos de la tabla 15, el costo fijo para la transmisión de los datos de los magnetómetros es un total de S/ 9097.20 por año, fuera de gastos de mantenimiento de equipos, repuestos, etc. Este costo representa un incremento de aproximadamente 850% frente a la propuesta inicial en la que se priorizaba el operador móvil Movistar. Se debe tener en cuenta que en esta nueva configuración el 71.83% de CCPP trabaja con el operador Movistar.

Capítulo 4: Propuesta de Planeamiento

En este capítulo, se hará una propuesta de planeamiento para el Proyecto Perú-Magneto. Específicamente se utilizará el Incrementalismo Articulado, debido a que una de sus principales características es realizar cambios o transformaciones graduales en un sistema para llevarlo de un estado inicial a un estado deseado. Todo esto bajo una organización que permita la evaluación continua de los cambios realizados para, en caso de necesitarlo, realizar correcciones que lleven al estado deseado. (Melo,1988)

4.1 División del Proyecto

Como primera acción para comenzar a emplear esta herramienta de planeamiento, procederemos a dividir el proyecto Perú-Magneto. Específicamente en cuatro etapas que serán descritas a continuación.

- Financiamiento
- Exploración
- Instalación
- Procesamiento de Datos

4.1.1 Etapa de Financiamiento

Se considera para esta etapa los trámites y procesos necesarios para obtener el financiamiento para la compra de todos los magnetómetros necesarios para la expansión de la red, también los costos de mantenimiento y puesta en marcha del proyecto. En esta etapa influyen mucho los factores externos y/o ajenos al proyecto como el ruido político, etc.

4.1.2 Etapa de Exploración

Esta etapa hace referencia a la búsqueda de sitios idóneos para la instalación de un magnetómetro, este tema ha sido tratado ampliamente a lo largo de esta tesis para la cual se ha desarrollado un algoritmo que permita identificar previamente estas zonas y signifique un ahorro de tiempo y recursos en los viajes de campo para realizar las pruebas finales previas a la instalación de un magnetómetro.

A medida que se realice la exploración de sitios de instalación se deberán establecer contactos de interés para asegurar los sitios de instalación adecuados. Se espera tratar con un factor “humano” que es convencer a las personas de la importancia del proyecto y que puedan así ceder una parte de sus terrenos para la instalación del magnetómetro. Otra tarea es ubicar sucursales de proveedores logísticos, etc. para simplificar la siguiente etapa del proyecto.

4.1.3 Etapa de Instalación

En esta etapa del proyecto se hace referencia a todo el periodo de tiempo que tome finalizar la instalación de todos los magnetómetros. Un factor a considerar en esta etapa son las fechas de llegada de los magnetómetros, tras finalizar su fabricación, a la ciudad de Lima. Una opción es acopiar temporalmente los magnetómetros en el local del INRAS para realizar pruebas de correcto funcionamiento antes de enviarlos a su instalación.

Ante la magnitud del proyecto, es conveniente separar la totalidad de la costa del Perú en zonas compuestas por un número reducido de magnetómetros. Las zonas pueden estar diferenciadas aprovechando la división geográfica de la costa, es decir, por departamentos. Esto supone una ventaja ya que se puede establecer como centro de operaciones la capital de cada departamento y comenzar el proceso de logística desde la ciudad hacia los puntos seleccionados dentro de la zona.

Durante esta etapa es necesario contratar personal técnico o encargados para cada zona, estas personas serán las responsables de realizar un despistaje rápido ante algún desperfecto en un magnetómetro, estas personas deberán de recibir una capacitación por parte del personal del INRAS. Finalmente, el proceso es repetitivo para cada zona, es decir, establecer un centro de operaciones para la logística; ubicar, contratar y capacitar a técnicos encargados y realizar las instalaciones de los magnetómetros.

4.1.4 Etapa de procesamiento de datos

Esta etapa inicia desde que el primer magnetómetro es instalado, el procesamiento de los datos se realiza en el INRAS con un software propio. Aquí también se encuentran contemplados los mantenimientos preventivos y correctivos a los distintos magnetómetros.

4.2 Aplicación del Incrementalismo Articulado

Según las etapas de la expansión de la red de magnetómetros y la metodología del Incrementalismo Articulado propuesta por Melo, se tiene lo siguiente:

- a) Identificar una problemática: Planeamiento para la expansión de la red de magnetómetros del proyecto Perú-Magneto.
- b) Identificar la tecnología apropiada de articulación: desarrollado en la Tabla XVIII.

Tabla XVII
Tecnología apropiada de articulación.

Etapas del Proyecto	Aplicación	Tarea Articuladora	Instrumento Articulador
Exploración	Búsqueda de nuevas zonas de instalación de magnetómetros	Implementación de software/algoritmo para seleccionar puntos de interés	Proyecto de implementación de software /algoritmo
	Pruebas de campo previas a la instalación de un magnetómetro	Visitas de campo, entrevistas con lugareños, establecer lazos y conexiones	Creación de un folleto informativo del proyecto, así como un protocolo de interacción.
	Monitoreo de la llegada de magnetómetros a Lima	Coordinación constante con proveedores y operadores logísticos	Uso de herramientas e indicadores para seguimiento a proyectos
	Prueba de operatividad de los magnetómetros en INRAS	Proceso de revisión de equipos	Desarrollo de procedimientos y manuales para la revisión de equipos
	Definición de zonas de instalación de magnetómetros	Reuniones con el personal del INRAS para establecer zonas	Creación de mini-proyectos de expansión por zonas
Instalación	Movilización de magnetómetros a la zona de instalación	Coordinación con proveedores logísticos	Plan para instalación de magnetómetros
	Selección de personal técnico o encargados de zona	Capacitaciones a encargados de zona	Plan de capacitación a cargo del equipo del INRAS
Procesamiento de datos	Mantenimiento preventivo y correctivo de magnetómetros	Comunicación constante con encargados de zonas	Elaboración de guías de mantenimiento de equipos, envío de repuestos a las zonas.

Se han definido tareas articuladoras en base a las distintas etapas del proyecto, en su mayoría durante la etapa de exploración serán tareas repetitivas por lo que se recomienda la elaboración de manuales, folletos y procedimiento estándar que permitan simplificar las tareas.

Durante la etapa de instalación, es necesario diseñar y poner en marcha un plan de capacitación para personas o contactos de interés que serán de apoyo en cada zona; se entiende que una zona está compuesta por uno o más magnetómetros, entonces

la persona encargada podría apoyar para visitas técnicas rápidas, ayuda con pequeñas tareas logísticas, etc.

c) Seleccionar el núcleo de las organizaciones participantes:

Tabla XVIII
Organizaciones participantes.

Tarea Articuladora	Núcleo
Implementación de software para seleccionar puntos de interés	<ul style="list-style-type: none"> • Dirección del INRAS • Investigadores del INRAS
Visitas de campo, entrevistas con lugareños, establecer lazos y conexiones	<ul style="list-style-type: none"> • Equipo de exploración del INRAS
Coordinación constante con proveedores y operadores logísticos	<ul style="list-style-type: none"> • Equipo de instalación del INRAS • Área de Logística de la PUCP
Proceso de revisión de equipos	<ul style="list-style-type: none"> • Investigadores de la PUCP
Reuniones con el personal del INRAS para establecer zonas	<ul style="list-style-type: none"> • Dirección del INRAS • Equipo de Instalación del INRAS • Área de Logística de la PUCP
Coordinación con proveedores logísticos	<ul style="list-style-type: none"> • Equipo de Instalación del INRAS • Área de Logística de la PUCP
Capacitaciones a encargados de zona	<ul style="list-style-type: none"> • Equipo de Instalación del INRAS
Comunicación constante con encargados de zonas	<ul style="list-style-type: none"> • Investigadores del INRAS • Encargados de zonas

Para las tareas articuladoras identificadas y que tienen que ver con la parte científica y planificación tiene como núcleo al INRAS ya que es el instituto que manejaría la expansión del proyecto y tiene al personal adecuado para realizar dichas tareas y compartir conocimientos en las capacitaciones. Por otro lado, en tareas netamente logísticas se dependerá, en mayor medida, del área encargada en la universidad para simplificar las tareas. Esta ha sido la forma en como se ha repartido las tareas desde los inicios del proyecto.

d) Identificar otros sectores o grupos de interés:

*Tabla XIX
Sectores o grupos de interés.*

Tarea Articuladora	Otros sectores o grupos de interés
Implementación de software para seleccionar puntos de interés	<ul style="list-style-type: none"> • Vicerrectorado de Investigación de la PUCP • Oficina de Propiedad Intelectual de la PUCP
Visitas de campo, entrevistas con lugareños, establecer lazos y conexiones	<ul style="list-style-type: none"> • Oficina de Dirección de Comunicación Institucional de la PUCP
Coordinación constante con proveedores y operadores logísticos	<ul style="list-style-type: none"> • ADUANAS • Proveedores logísticos • Ministerio de Transportes y Comunicaciones
Proceso de revisión de equipos	<ul style="list-style-type: none"> • Operadores de telefonía móvil
Reuniones con el personal del INRAS para establecer zonas	<ul style="list-style-type: none"> • Operadores logísticos • Operadores de telefonía móvil
Coordinación con proveedores logísticos	<ul style="list-style-type: none"> • Oficina de Presupuestos de la PUCP
Capacitaciones a encargados de zona	<ul style="list-style-type: none"> • Oficina de Presupuestos de la PUCP
Comunicación constante con encargados de zonas	<ul style="list-style-type: none"> • Operadores de telefonía móvil • Oficina de Presupuestos de la PUCP

Para este caso, uno de los grupos de interés puede ser el área de Comunicación Institucional de la universidad, es necesario difundir los avances y bondades del proyecto tanto para beneficio de la universidad como del proyecto mismo. Se puede utilizar la publicidad como una ventaja para poder convencer a las personas dueñas de terrenos para que den los permisos de alojar un magnetómetro.

El área de propiedad intelectual de la PUCP sería otro grupo interesado ya que, de avanzar con la investigación, el INRAS podría conseguir un método fiable para la predicción de sismos, esto supondría un avance novedoso en el mundo y la universidad debería de capitalizar este suceso.

Capítulo 5: Evaluación Económica del Proyecto

En este capítulo se hará una evaluación económica para la posible implementación de la expansión de la red de magnetómetros.

5.1 Evaluación de la primera propuesta de red

En primer lugar, se tomará la propuesta de expansión de magnetómetros que minimiza los costos anuales de internet móvil priorizando el uso del operador Movistar. Para esta configuración, la cual se muestra en la figura 25, se debería de instalar 24 magnetómetros adicionales a los existentes de la red; obteniendo un total de 34 magnetómetros. Así tenemos el primer costo de inversión que se muestra en la siguiente tabla:

Tabla XX
Precio total de Magnetómetros para la red de 32 unidades

Compra de Magnetómetros	
Cantidad	24.00 UND
Precio unitario	\$40,000.00
Total	\$960,000.00
Impuestos (aprox. 30%)	\$28,800.00
Movilización magnetómetros a provincia	\$10,000.00
Total Precio de Magnetómetros	\$1,038,824.00

Adicionalmente, como se describió en el capítulo anterior es conveniente dividir la costa del Perú por zonas para distribuir eficientemente los esfuerzos y recursos durante las etapas de exploración de CCPP e instalación de magnetómetros. Por ese motivo se ha dividido la costa en un total de 5 zonas, cada una de estas contiene un número diferente. Se hace esta diferenciación debido a las facilidades logísticas; es decir, se puede llegar a algunas zonas por viaje en avión mientras que, en otras, resulta más económico el alquiler de una camioneta para hacer trabajos de exploración, instalación o mantenimiento. Las zonas son

Tabla XXI
Zonas de la Red de magnetómetros- primera propuesta.

Número de Zona	Departamentos	Número de Magnetómetros
Zona1	Lima – Ancash - Ica	15
Zona 2	Arequipa	4
Zona 3	Tacna – Moquegua	4
Zona 4	Tumbes – Piura	5
Zona 5	La Libertad – Lambayeque	6

Según los gastos históricos del proyecto, se ha hecho la siguiente estimación de costos por zona que son principalmente tres: gastos de exploración, instalación y mantenimiento. Estos gastos incluyen, entre otros, alquileres de vehículos, viáticos, compra de herramientas, compra de equipos, etc. Se está considerando que los viajes de mantenimiento deben de hacerse dos veces por año. En la siguiente tabla se muestra la estimación de costos:

*Tabla XXII
Costos asociados a la implementación de la red de magnetómetros – 32 unidades*

Número de Zona	Etapa Exploración	Etapa Instalación	Mantenimientos al año
Zona 1	\$5,100.00	\$5,500.00	\$11,000.00
Zona 2	\$3,660.00	\$4,980.00	\$9,960.00
Zona 3	\$3,660.00	\$4,980.00	\$9,960.00
Zona 4	\$4,300.00	\$5,690.00	\$11,380.00
Zona 5	\$4,940.00	\$5,830.00	\$11,660.00
Total	\$21,660.00	\$26,980.00	\$53,960.00

Finalmente, se puede concluir que para la implementación de la red con menor número de magnetómetros se necesita una inversión inicial de aproximadamente \$1,087,464 que representa la compra de magnetómetros y su instalación.

Adicionalmente, en esta configuración de la red tiene un costo anual de aproximadamente \$285.00 calculado con el resultado del algoritmo; esto aumento el valor del mantenimiento anual de la red a \$54,245.00.

5.2 Evaluación de la segunda propuesta de red

Para la segunda propuesta de la red, primó el criterio de que esta debería tener más intersecciones entre las áreas de sensibilidad de los magnetómetros para fomentar así la triangulación de pulsos electromagnéticos. Por ese motivo el resultado final del algoritmo fue que la red debería de estar compuesta por un total de 71 magnetómetros incluyendo las ya instalados.

En esta etapa se aplicarán los mismos criterios de evaluación económica y así tenemos:

Tabla XXIII
Precio total de Magnetómetros para la red de 71 unidades.

Compra de Magnetómetros	
Cantidad	61.00 UND
Precio	\$40,000.00
Total	\$2,440,000.00
Impuestos (aprox. 30%)	\$73,200.00
Movilización magnetómetros a provincia	\$10,000.00
Total Magnetómetros	\$2,563,261.00

La división de zonas seguirá siendo la misma; sin embargo, aumentará el número de magnetómetros por zona como se aprecia en la siguiente tabla:

Tabla XXIV
Zonas de la red de magnetómetros - segunda propuesta

Número de Zona	Departamentos	Número de Magnetómetros
Zona 1	Lima – Ancash - Ica	35
Zona 2	Arequipa	7
Zona 3	Tacna – Moquegua	5
Zona 4	Tumbes – Piura	11
Zona 5	La Libertad – Lambayeque	12

Del mismo modo, la proyección de gastos en las etapas de exploración, instalación y mantenimiento se harán de registros históricos del proyecto. Estos son:

Tabla XXV
Costos asociados a la implementación de la red de magnetómetros – 71 unidades

Número de Zona	Etapas Exploración	Etapas Instalación	Mantenimientos al año
Zona 1	\$11,900.00	\$12,950.00	\$25,900.00
Zona 2	\$6,220.00	\$7,820.00	\$15,640.00
Zona 3	\$4,300.00	\$6,400.00	\$12,800.00
Zona 4	\$8,140.00	\$9,950.00	\$19,900.00
Zona 5	\$8,780.00	\$10,660.00	\$21,320.00
Total	\$39,340.00	\$47,780.00	\$95,560.00

En conclusión, se obtiene que la inversión inicial para la red de magnetómetros de 71 unidades equivale a un total de \$2,650,351.00. Por otro lado, su costo de mantenimiento anual es de \$98,260.00 que incluyen los \$2,700.00 de conexión a internet.

5.3 Comparación de resultados

En la siguiente tabla se puede apreciar la comparación económica de las dos configuraciones de redes presentadas en esta tesis.

Tabla XXVI
Comparación de resultados de proyección económica

Tipo de Red	Inversión inicial	Mantenimiento anual
34 magnetómetros	\$1,087,464	\$54,245.00
71 magnetómetros	\$2,650,351.00	\$98,260.00

Es necesario recordar que el proyecto Perú-Magneto es un proyecto de investigación que podría llevar a un gran impacto social; sin embargo, durante la etapa de investigación el proyecto no ofrece ningún retorno o ganancia a la inversión realizada en ampliar la red de magnetómetros. Los posibles inversionistas deben de estar convencidos que los aportes serán con fines altruistas y de apoyo a la investigación científica en el país. Entre estos podría estar el estado peruano a través de organismos como el Ministerio de Defensa o Defensa Civil. Por otro lado, en el sector privado las empresas de seguros podrían generar una gran rentabilidad si es que el proyecto llega a completar sus objetivos finales.

Capítulo 6: Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

- Se desarrolló un algoritmo capaz de determinar los CCPP por los que debería de empezar la expansión de la red Perú-Magneto en dos configuraciones: la primera minimizando los costos anuales de conexión a internet móvil y con un total de 32 magnetómetros; la segunda, priorizando la triangulación de pulsos electromagnéticos o área de estudio con un total de 71 magnetómetros.
- Según estos resultados, ambas configuraciones tienen costos anuales de conexión a internet de S/ 957.60 y S/ 9097.20 respectivamente, obteniendo así un ahorro en dinero en gastos fijos una vez que se implemente la expansión del proyecto.
- La configuración con el mínimo de costos representa una opción que facilita el financiamiento del proyecto ya que se necesitaría la compra de una cantidad menor de magnetómetros lo cual reduce también el costo de mantenimiento y operación de toda la red.
- Por otro lado, la configuración de la red con prioridad de la triangulación de pulsos electromagnéticos. Beneficia enormemente la investigación ya que permitiría recolectar una cantidad mayor de datos para ser procesados.
- A pesar de su costo anual, el tener una mayor cantidad de magnetómetros podría incrementar las probabilidades de éxito del proyecto Perú-Magneto y, podría darse la posibilidad, de predecir un gran sismo como el que se espera en las costas de Lima salvando así miles de vidas humanas, edificaciones, centros de datos con información sensible, etc.

6.2 Recomendaciones

- El algoritmo puede replicarse con otro tipo de restricciones, es decir, podría prepararse una nueva base datos con menor o mayor distancia a fuentes de ruido.
- Del mismo modo, el algoritmo puede aplicarse a otros países extendiendo aún más la red Perú-Magneto. Todo esto siempre que se disponga de la información correspondiente.
- Es necesario tener en cuenta para la implementación de este algoritmo la información en cuanto a CCPP y cobertura móvil. Esta información puede ir actualizándose con el tiempo aumentando los CCPP con cobertura móvil en el caso de los operadores, permitiendo así nuevas configuraciones para la expansión de la red Perú-Magneto.

Referencias Bibliográficas

- Aggarwal, C. C., & Reddy, C. K. (2014). Data Clustering: Algorithms and Applications. In *Data Clustering: Algorithms and Applications* (pp. 2-3). Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Bang, W. (2010). *Coverage Control in Sensor Networks*. Londres: Springer.
- Cutler, J., Bortnik, J., Dunson, C., Doering, J., & Bleier, T. (2007). CalMagNet- an array of serach coil magnetometers monitoring ultralow frequency activity in California. In *European Geosciences Union. Natural Hazards and Earth System Science* (pp. 359-368). Copernicus Publications on behalf of the European Geoscineces Union.
- Dargie, W., & Poellabauer, C. (2010). *Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice*. John Wiley & Sons Ltd.
- De La Cruz, K., Cieza, J., & Flores, C. (2012). *Aplicación del modelo de clusterización basado en el algoritmo de K-means para la segmentación de la morbilidad materna en el hospital San Bartolomé de la ciudad de Lima*. Lima.
- Dunson, J., Bleier, T., Roth, S., Heraud, J., Alvarez, C., & Lira, J. (2011). The Pulse Azimuth effect as seen in induction coil magnetometers located in California and Peru. *Natural Hazards Earth Systems Science*, 2085 - 2105.
- E. Dunn, C., & Newton, D. (1992). Optimal Routes in GIS and Emergency Planning Applications. *Area*, 24(3), 259-267.
- Everitt, B. S., Landau, S., Leese, M., & Stahl, D. (2011). *Cluster Analysis*. Wiley.
- Ferguson, T. S. (n.d.). *Linear Programming: A Concise Introduction*. Retrieved from <https://www.math.ucla.edu/~tom/LP.pdf>
- Heraud, J., & Centa, V. (2014). Triangulation of Pulses of Electromagnetic Activity to Determine When and Where Earthquakes will occur in Central Peru. *4th Bi-Annual International Geo-Hazards Research Symposium*, 1-3.
- Heraud, J., Centa, V., & Bleier, T. (2017). Images of the Benioff Zone in the Lithosphere using Electromagnetic Energy Released from Stress in Tectonic Plates. *XXXIInd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science*, 1-3.
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2015). *Investigación de Operaciones*. México: Mc Graw Hill.
- INEI. (2017). *Directorio Nacional de Centros Poblados, Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas*. Lima: Dirección Nacional de Censos y Encuestas.
- Jovanovic, V., & Njegus, A. (2008). THE APPLICATION OF GIS AND ITS COMPONENTS IN TOURISM. *Yugoslav Journal of Operations Research*(2), 261-272. doi:10.2298/YUJOR0802261J
- Karaulkar A., S., & Oh, J.-Y. (2016). Optimal Placement of Base Station for Cellular Network Expansion. In *Issues in Information Systems* (Vol. 17, pp. 215-221).

- Kiptenai, T., & Hunja, E. (2013). GIS Location-Allocation Model in Improving Accessibility to Health Care Facilities: A Case Study of Mt. Elgon Sub-County. *Internation Journal of Science and Research (IJSR)*.
- Mandel, A., Ferrero, V., Graser, A., & Bruy, A. (2016). *QGIS 2 Cookbook*. Birmingham, UK: Packt Publishing. Retrieved from https://docs.qgis.org/testing/en/docs/user_manual/index.html
- Melo, M. (1977). Articulated Incrementalism a Strategy for Planning (with special reference to the design of an information system as an articulative task). In *Tesis de Doctorado*. Filadelfia: University of Pennsylvania.
- Melo, M. (1987). *O planejamento para acelerar o processo*.
- Melo, M., & Magacho, L. (2013). Services for People Innovation Park: Planning Methodologies. In *Journal of technology management & innovation* (pp. 19-19). doi:<https://doi.org/10.4067/S0718-27242013000300019>
- Mokhtar S., B., Hanif D., S., & C.M., S. (2006). *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms*. USA: Wiley-Interscience.
- Mulligan, R., & Ammari M., H. (2010). Coverage in Wireless Sensor Networks: A survey. In M. Institute, *Network Proctcls and Algorithms* (Vol. II, pp. 27-53).
- Mustafa, I., Din, N., Ismail, A., & Omar, R. (2012). Use of Geographic Information System (GIS) tools as network planning aid for antenna mounting in remote areas. In *2012 International Symposium on Telecommunication Technologies* (pp. 11-15). Kuala Lumpur.
- Rebai, M., Le berre, M., Snoussi, H., Hnaien, F., & Khoukhi, L. (2015). Sensor Deployment Optimization Methods to Achieve Both Coverage and Connectivity in Wireless Sensor Networks. In *Computers & Operations Research* (Vol. 59, pp. pp 11-21).
- Siomina, I. (2007). *Radio Network Planning and Resource Optimization: Mathematical Models and Algorithms for UMTS, WLANs, and Ad Hoc Networks*. Linköping, Sweden: Linköping Studies in Science and Technology, D.