

# LOCALIZACIÓN DE PUESTOS FORESTALES

## INFORME FINAL

**Guina Guadalupe Sotomayor Alzamora**

DNI 40308192

Instituto de Matemática y Ciencias Afines (IMCA)

Calle Los Biólogos 245 - Urbanización San Cesar, Lima - Perú

e-mail: guina@imca.edu.pe, guinas@gmail.com

teléfono: +51953620511

Junio 2017

El presente informe resume las actividades realizadas como post-doctorante del proyecto **Modelización matemática orientada a la gestión de recursos naturales** del Instituto de Matemática y Ciencias Afines (IMCA) de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), durante el periodo de junio de 2016 a abril de 2017. Se presentan también los resultados alcanzados a través de modelos de programación matemática utilizados en el estudio de localización de puestos forestales para Perú y los métodos de solución utilizados, principalmente vía heurísticas, utilizando datos sobre deforestación, como la pérdida de bosques entre el 2000 y el 2014, así como la actual localización de sedes y puestos forestales.

### 1 Introducción

El órgano responsable por el control forestal de áreas preservadas tiene como misión promover, proteger y recuperar áreas forestales, contribuyendo al mantenimiento de áreas existentes y evitando la tala indiscriminada e/o ilegal en el Perú. Por tal motivo, todas las regiones, inclusive las más alejadas, deben ser alcanzadas, de tal modo que se promueva la conservación forestal en el país.

El Perú posee 73,3 millones de hectáreas de bosques, por tanto es necesario desarrollar y operar un sistema de monitoreo que ofrezca, por lo menos en base anual, la tasa oficial de pérdida de bosques por acción de tala ilegal, ya que 22,2% son bosques en áreas naturales protegidas y 30,4% son bosques sin categorización territorial, lo cual dificulta su control, estos últimos están localizados principalmente en la costa y sierra (Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el estado - SERNANP, *apud* [29]).

En este sentido, realizar un estudio sobre recursos naturales, que auxilie en la toma de decisiones de los organismos competentes y que pueda servir de ayuda en la minimización de la deforestación se torna importante, sobre todo en un país que posee casi dos tercios de su superficie cubierta de bosques [20].

Así mismo, la programación matemática está cada vez más accesible a analistas de sistemas logísticos, incrementando sistemas de modelos por computador, optimizadores de programación matemática, sistemas de gerenciamiento de datos, sistemas de información geográfica (SIG), entre otros [15], los cuales sirven de apoyo a los tomadores de decisiones, a fin de alcanzar sus objetivos, los que pueden ser para minimizar costos de diversos tipos, maximizar lucros; entre otros.

Diversas iniciativas están siendo desarrolladas en el Perú, las cuales actualmente

están siendo unificadas, formándose equipos de orden interinstitucional entre el Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI) y el Ministerio del Ambiente (MINAM), los cuales están trabajando bajo la iniciativa de la Organización del Tratado de Cooperación Amazónica (OTCA), realizando planes nacionales de monitoreo de la cobertura forestal, implementando Sistemas Nacionales de Monitoreo, y organizando foros de intercambio y concertación con diversos proyectos de la OTCA [29].

Con la finalidad de ampliar la base de conocimientos sobre el tema de investigación abordado, se han realizado visitas a especialistas, para conocer más sobre el trabajo que realizan y obtener datos a ser utilizados durante el desarrollo de los experimentos computacionales, los cuales se obtuvieron por parte de la oficina competente a través del canal de internet.

Entre las dificultades encontradas por tales especialistas se encuentra el proceso de recolección de información de datos de los bosques peruanos, ya que actualmente son usados programas del tipo caja negra, los cuales no siempre reconocen la correcta categorización de los bosques, dada la compleja geografía peruana, así mismo, al no conocer más sobre los algoritmos que son usados durante el procesamiento de imágenes, desde su captura por el satélite hasta obtención de las imágenes corregidas con las que trabajan, el equipo se torna dependiente de los desarrolladores de los programas utilizados.

Con esto, a principio se definieron dos líneas de investigación, la primera trabajando con el tema de localización de instalaciones de control forestal, cuyo objetivo principal ha sido el de evaluar la distribución espacial de unidades forestales existentes y las diferentes áreas afectadas con la deforestación y la segunda, que abarcando el procesamiento de imágenes, con la finalidad de trabajar con imágenes crudas del satélite, para obtener imágenes corregidas que ayuden a encontrar datos sobre deforestación.

La estructura del informe es la siguiente: en la sección 2 se expone el tema de recursos forestales, la primera línea de investigación, sobre localización de puestos forestales, se expone en la sección 3, donde se presentan los modelos matemáticos utilizados para los experimentos computacionales en los diversos escenarios propuestos, así como las heurísticas desarrolladas durante el desarrollo del proyecto. En la sección 4 son presentados los avances alcanzados durante la segunda línea de investigación, sobre procesamiento de imágenes, y su avance actual. En la sección 5 son presentados los experimentos computacionales alcanzados. Finalmente, las conclusiones del desarrollo del proyecto son expresados en la sección 6.

## **2 Recurso forestal**

Se denominan bosques a los ecosistemas donde predominan especies arbóreas en cualquier estado de desarrollo y cuya cobertura de copa supera el 10% de la superficie en condiciones áridas o semiáridas, o el 25% en circunstancias más favorables. Estos, constituyen ecosistemas complejos, pueden aportar beneficios de orden económico, social, ambiental, proporcionan productos y servicios que contribuyen al bienestar de la población y son vitales para la economía, el medio ambiente y la vida cotidiana [19]. Algunos tipos de bosques peruanos son:

- Bosque andino, son ecosistemas que se encuentran entre los más diversos y amenazados ecosistemas terrestres, se encuentran generalmente en un rango altitudinal desde los 1000 a 5200 m.s.n.m.
- Bosque natural, capaz de regenerarse por sucesión natural, poseen especies nativas o autóctonas.

- Bosque primario, caracterizado por la abundancia de árboles maduros con especies del dosel superior o dominante, que ha evolucionado de manera natural, poseen vegetación original o de crecimiento antiguo.
- Bosque seco, ecosistemas estacionales sometidos a largos periodos de estrés hídrico con escasa precipitación anual, cuya vegetación se encuentra asociada a fenómenos climáticos.
- Bosque secundario, son extensiones boscosas de carácter sucesional, surgidas como proceso de recuperación natural de áreas en las cuales el bosque primario fue retirado como consecuencia de actividades humanas o por causas naturales.

Según la *Food and Agriculture Organization (FAO) apud* [19], la subregión de América del Sur tropical, que comprende Colombia, Guayana Francesa, Guyana, Surinam, Venezuela, Ecuador, Perú, Bolivia, Paraguay y Brasil, constituyen la concentración más grande de bosque pluvial tropical del mundo, con cerca de 885 millones de hectáreas situadas en la cuenca del Amazonas y otras 85 millones de hectáreas en el complejo de la Cuenca del Orinoco y de Paraná. El área total de la tierra en América del Sur tropical es de 1387 millones de hectáreas, por lo que el problema de deforestación es considerado de vital importancia para los países involucrados, los cuales poseen leyes para apoyar la conservación de bosques. En el Perú, el marco político legal sobre recursos forestales está dado por:

- Decreto Legislativo Nro. 1220, del 24 de setiembre de 2015, establece medidas para la lucha contra la tala ilegal, donde se declara de necesidad pública, interés nacional y de ejecución prioritaria acciones de interdicción contra la tala ilegal y el tráfico ilegal de productos forestales maderables, así como las actividades relacionadas a estos.
- Ley Forestal y de Fauna Silvestre Nro. 29763, tiene por finalidad promover la conservación, protección, incremento, uso sostenible de patrimonio forestal y de fauna silvestre dentro del territorio nacional.
- Reglamento para la Gestión Forestal, tiene como objetivo regular la interinstitucionalidad, planificación, zonificación el ordenamiento y la información vinculada a la gestión forestal y de fauna silvestre (Decreto Supremo Nro. 018-2015-MINAGRI).

### 3 Localización de instalaciones

En general, problemas de localización involucran información espacial (geográfica) sobre un conjunto de clientes distribuidos entre puntos con potencial con la finalidad de localizar instalaciones para satisfacer algún tipo de demanda de clientes [9, 21]. Este tipo de problemas, en su mayoría, intentan resolver las siguientes preguntas: (i) ¿qué instalaciones deben ser usadas y/o abiertas?, (ii) ¿qué clientes deben ser atendidos? y (iii) ¿por cuáles instalaciones?, con la finalidad de minimizar el costo total. De forma adicional, a estas características genéricas, un número de restricciones son introducidas para cada aplicación específica, según el problema abordado [18].

Según ReVelle y Eiselt [27], existen cuatro componentes que caracterizan los problemas de localización, que son: (i) clientes, los cuales están localizados en puntos o rutas, (ii) instalaciones, que serán localizadas, (iii) lugares, donde los clientes e instalaciones estén localizados y (iv) una métrica, que traduzca el valor del objetivo entre clientes e instalaciones.

Aplicaciones de problemas de localización van desde puestos de gasolina y puestos de comida rápida hasta rellenos sanitarios y plantas eléctricas [27]. Desde el punto de vista de

aplicaciones, no hay limitación para los usuarios del problema de localización, que pueden ser entidades gubernamentales o privadas [11]. Debido a su potencial práctico, el problema de localización ha generado diversos artículos e investigaciones, entre los artículos de tipo revisión de la literatura están: Brandeau y Chiu [5], Owen y Daskin [22], ReVelle y Eiselt [27], Klose y Drexler [14], Snyder [31], Sahin y Sural [6], Farahani *et al.* [11], Melo *et al.* [18], ReVelle *et al.* [28], ya entre los libros sobre problemas de localización de instalaciones se destacan Drezner [8], Farahani y Hekmatfar [10], entre otros.

En esta investigación, modelos matemáticos para el problema de localización de puestos forestales están siendo estudiados, con sus diferentes características y considerando las dificultades encontradas con la finalidad de encontrar soluciones factibles, cercanas a las óptimas, en un tiempo computacional razonable. Aquí, los clientes son representados como áreas que presentan deforestación e instalaciones son los puestos forestales.

Con esto se busca minimizar los costos de localización de unidades forestales, maximizar la cobertura del área atendida disminuyendo así los costos de desplazamiento y con ello verificar la necesidad de implantación de unidades forestales nuevas y/o adaptación de las unidades actuales a un nivel superior. Así, se espera mejorar la conservación de las áreas preservadas utilizando datos actuales de deforestación y disminuir los focos con mayor incidencia de deforestación, a través de un mejor control en las áreas preservadas.

### 3.1 Modelo de la $p$ -mediana

El modelo matemático más popular asociado al problema de localización es el modelo de la  $p$ -mediana [23], cuyas primeras formulaciones fueron presentadas por Hakimi [12] y Kariv y Hakimi [13]. En la versión simplificada del modelo se fija un número de instalaciones o medianas  $p$  a ser localizadas en el conjunto de puntos dados, de modo que se minimice la suma ponderada de las distancias de los clientes, centrados en puntos del conjunto, a las instalaciones que prestarán servicios considerando la demanda asociada a cada punto.

Sean los parámetros:  $N$  el conjunto de  $n$  puntos o nodos dados y sus índices  $i, j \in N$ ;  $p$  ( $< n$ ) el número de medianas a ser localizadas;  $w_i$  la demanda o peso asociado a cada punto  $i$ ; y  $[d_{ij}]_{n \times n}$  la matriz simétrica de distancias, donde cada elemento  $d_{ij}$  es la distancia del punto  $i$  al punto  $j$ , con  $d_{ii} = 0, \forall i$ . Considere aún a ser determinada la matriz de alocaiones  $[z_{ij}]_{n \times n}$ , donde  $z_{ij} = 1$ , si el punto  $i$  es alocado a  $j$ , y  $z_{ij} = 0$ , caso contrario;  $z_{jj} = 1$  indica que  $j$  es una mediana y  $z_{jj} = 0$  indica el caso contrario. Entonces, el modelo de la  $p$ -mediana puede ser formulado de la siguiente forma:

$$\text{minimizar } \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} w_i d_{ij} z_{ij} \quad (1)$$

$$\text{sujeto a } \sum_{j \in N} z_{ij} = 1 \quad i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N} z_{jj} = p \quad (3)$$

$$z_{ij} - z_{jj} \leq 0 \quad i, j \in N \quad (4)$$

$$z_{ij} \in \{0, 1\} \quad i, j \in N, \quad (5)$$

donde el objetivo (1) es minimizar la suma ponderada de las distancias entre los puntos dados y los puntos seleccionados como medianas; las restricciones en (2) indican que cada punto  $i$  es conectado solamente a una única mediana  $j$ ; la restricción (3) garantiza que hay exactamente  $p$  medianas; las restricciones en (4) afirman que cada punto debe ser atribuido a una mediana y, finalmente, variables de decisión binarias son impuestas en (5).

Así mismo, es conocida la variación de la  $p$ -mediana, que no considera la demanda o el peso asociado a cada punto, basándose sólo en la distancia para la minimización de costos, la formulación de este modelo que denominaremos  $p$ -mediana-variante se describe a continuación.

Sean los parámetros:  $N$  el conjunto de  $n$  puntos o nodos dados y sus índices  $i, j \in N$ ;  $p$  ( $< n$ ) el número de medianas a ser localizadas;  $[d_{ij}]_{n \times n}$  la matriz simétrica de distancias, donde cada elemento  $d_{ij}$  es la distancia del punto  $i$  al punto  $j$ , con  $d_{ii} = 0, \forall i$ . Considere a ser determinada la matriz de alocaiones  $[z_{ij}]_{n \times n}$ , donde  $z_{ij} = 1$ , si el punto  $i$  es alocado a  $j$ , y  $z_{ij} = 0$ , caso contrario;  $z_{jj} = 1$  indica que  $j$  es una mediana y  $z_{jj} = 0$  indica el caso contrario. Así, el modelo de la  $p$ -mediana-variante, que no incluye la demanda en cada punto, puede ser formulado de la siguiente forma:

$$\text{minimizar } \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} d_{ij} z_{ij} \quad (6)$$

$$\text{sujeto a } \sum_{j \in N} z_{ij} = 1 \quad i \in N \quad (7)$$

$$\sum_{j \in N} z_{jj} = p \quad (8)$$

$$z_{ij} - z_{jj} \leq 0 \quad i, j \in N \quad (9)$$

$$z_{ij} \in \{0, 1\} \quad i, j \in N, \quad (10)$$

donde el objetivo (6) es minimizar la suma ponderada de las distancias entre los puntos dados y los puntos seleccionados como medianas; las restricciones en (7) indican que cada punto  $i$  es conectado solamente a una única mediana  $j$ ; la restricción (8) garantiza que hay exactamente  $p$  medianas; las restricciones en (9) afirman que cada punto debe ser atribuido a una mediana y, finalmente, variables de decisión binarias son impuestas en (10).

### 3.2 Métodos de solución

Los modelos de programación matemática pueden ser resueltos usando diferentes métodos de solución, los métodos exactos, las heurísticas, las metaheurísticas o los métodos híbridos [24].

Los métodos exactos, encuentran una solución que garantiza optimalidad, por lo que el tiempo de ejecución de un algoritmo exacto es, en general, mayor al tiempo de ejecución de otros métodos, en los que se resuelven problemas considerados difíciles o de tamaño grande. La opción de aplicar estos métodos depende de factores como la importancia de obtener una solución óptima, la disposición de recursos computacionales y el tamaño de problema [1]. Según Pizzolato *et al.* [23] el uso de heurísticas puede ser deseable cuando hay existencia de restricciones no explícitas o preferencias subjetivas no incorporadas al modelo o a consecuencia del uso de hipótesis simplificadoras. Estas pueden ser construidas caso a caso, en función del problema de estudio. Entretanto, las metaheurísticas se basan en el uso de conocimientos y relaciones lógicas del problema específico en busca de una solución satisfactoria y buscan primordialmente soluciones candidatas privilegiando recursos informáticos.

Los modelos de programación matemática basados en la  $p$ -mediana (1)–(5) y su variante 6)–(10), utilizados en el presente proyecto fueron resueltos usando el método exacto padrón del *solver* glpsol, del paquete GLPK [16], programa de uso académico gratuito, mas, limitado a un determinado número parámetros y variables.

A priori, para generar resultados computacionales preliminares utilizando los modelos propuestos, se ha utilizado el conjunto de datos de Lustosa *et al.* [15], que posee 2800 puntos de demanda, a continuación se ha fijado un número razonable de instalaciones (15), considerando la demanda como  $w_{ij} = 1$ . La generación del modelo por el *solver* muestra que hay más de un millón de variables y miles de restricciones, lo que torna el problema difícil de ser resuelto en tiempo aceptable y a un costo compatible con el presupuesto del proyecto por el *solver* utilizado, por lo que ha sido necesario considerar métodos heurísticos para encontrar la mejor solución de tal problema.

Así mismo, el problema en estudio posee un número grande de puntos de demanda, pues los datos proporcionados por el MINAM están representados por imágenes vectoriales y en píxeles, donde la representación de cada pixel corresponde al espacio territorial de  $30 \times 30m^2$ [19]. Además de conocer el espacio del territorio nacional según el área de cada distrito, se conocen datos sobre deforestación en la Amazonía Peruana, por lo que se tratarán dos instancias, la primera, abarcando 1828 distritos a nivel nacional, y la segunda, abarcando los 376 distritos afectados por deforestación en la Amazonía Peruana entre los años 2000 y 2014. Para poder tratar con tales datos, se ha realizado un pre-procesamiento de la información recolectada utilizando herramientas de sistema de información geográfica (SIG), base de datos y lenguajes de programación para, finalmente, resolver el problema de localización de puestos forestales usando el modelo de la  $p$ -mediana.

Como parte de los métodos de solución, se han utilizado diversas heurísticas para la resolución del problema propuesto, una de ellas se basa en el método Maranzana [17], cuyo algoritmo se muestra en 1, el cual comienza con una solución arbitraria con  $p$ -medianas, luego agrupa todos los datos a estas medianas, utilizando el criterio de distancia mínima, formando  $p$  *clusters* o agrupamientos. Mientras continúa encontrando una solución más óptima a la actual, se continúa realizando el reagrupamiento de puntos. El algoritmo finaliza si no encuentra una mejor solución, así, se ha encontrado la solución óptima o se ha caído en un óptimo local.

---

#### Algoritmo 1 MARANZANA

---

```

1: function MARANZANA(p)
2:    $S \leftarrow \text{randomize}(p)$ 
3:   flag  $\leftarrow 1$ 
4:   while flag==true do
5:      $S' \leftarrow \text{searchMedian}()$ 
6:     if  $S' < S$  then
7:        $S \leftarrow S'$ 
8:     else flag  $\leftarrow$  false
9:   return  $S$ 

```

---

Otra heurística utilizada se basó en el algoritmo *Greedy Randomized Adaptive Search (GRASP)* [25], usando búsqueda local [26]. El algoritmo 2 muestra la función principal del GRASP, donde básicamente se genera una solución randómica factible para el conjunto de datos evaluado y se realiza una búsqueda local para encontrar la mejor solución en un número máximo de iteraciones. El algoritmo 3 muestra el funcionamiento de la búsqueda local, aquí, se realizan evaluaciones entre la solución actual y las posibles soluciones encontradas en un rango de distancia pequeño, y evalúa la mejor opción entre los candidatos para entrar y/o salir de la solución actual, el método converge a una solución de mínimo local y retorna la solución encontrada.

También se ha utilizado una heurística sobre agregación espacial de datos, con la finalidad de disminuir los errores de agregación, empleando artificios para evaluar errores

---

**Algoritmo 2** GRASP

---

```
1: function GRASP(seed, maxit, elitesize)
2:    $S \leftarrow \text{randomize}(\text{seed})$ 
3:    $\text{init}(\text{elite}, \text{elitesize})$ 
4:   for  $i = 1$  to maxit do
5:      $S \leftarrow \text{randomizeBuild}()$ 
6:      $S \leftarrow \text{localSearch}(S')$ 
7:      $S' \leftarrow \text{select}(\text{elite}, s)$ 
8:     if  $S' \neq \text{NULL}$  then
9:        $S' \leftarrow \text{pathrelinking}(S, S')$ 
10:       $\text{add}(\text{elite}, S')$ 
11:     $\text{add}(\text{elite}, S)$ 
12:    $S \leftarrow \text{postoptimize}(\text{elite})$ 
13:   return  $S$ 
```

---

---

**Algoritmo 3** Búsqueda local

---

```
1: function LOCALSEARCH( $S, \phi_1, \phi_2$ )
2:    $A \leftarrow U$ 
3:    $\text{resetStructures}(\text{gain}, \text{loss}, \text{extra})$ 
4:   while TRUE do
5:     for  $u \in A$  do
6:        $\text{updateStructures}(S, u, \text{gain}, \text{loss}, \text{extra}, \phi_1, \phi_2)$ 
7:        $(f_r, f_i, \text{profit}) \leftarrow \text{findBestNeighbor}(\text{gain}, \text{loss}, \text{extra})$ 
8:       if  $\text{profit} \leq 0$  then
9:         break
10:       $A \leftarrow \emptyset$ 
11:     for  $u \in U$  do
12:       if  $(\phi_1(u) = f_r)$  or  $(\phi_2(u) = f_r)$  or  $(d(u, f_i) < d(u, \phi_2(u)))$  then
13:          $A \leftarrow A \cup \{u\}$ 
14:     for  $u \in A$  do
15:        $\text{undoUpdateStructures}(S, u, \text{gain}, \text{loss}, \text{extra}, \phi_1, \phi_2)$ 
16:      $\text{insert}(S, f_i)$ 
17:      $\text{remove}(S, f_r)$ 
18:      $\text{updateClosest}(S, f_i, f_r, \phi_1, \phi_2)$ 
```

---

introducidos en la reducción del modelo [7].

Finalmente, ha utilizado una heurística para unir las soluciones parciales halladas por departamento, para poder generar los resultados a nivel nacional. Los métodos heurísticos mencionados fueron desarrollados utilizando el lenguaje de programación C++. También, un programa prototipo, de visualización de datos, implementado con recursos gráficos usando los paquetes Qt y OpenGL en C++, fue desarrollado.

#### 4 Procesamiento de imágenes

Una preocupación relatada por parte expertos en el monitoreo de bosques, es el uso de los programas de tipo caja negra utilizados, donde no se conoce el proceso por el que pasa la imagen desde su obtención por el satélite, hasta la imagen consolidada, con la que trabajan. Por este motivo se ha estudiado sobre el manejo y procesamiento de imágenes satelitales. A principio, se sabe que el programa desarrollado por Gregory Asner [3] es ampliamente utilizado y facilita un curso de entrenamiento online para el programa *Carnegie Landsat Analysis System-lite* o CLASlite, para el monitoreo de bosques. Se ha determinado seguir el curso, por lo que a la conclusión de este, se ha obtenido la certificación respectiva y el acceso a la licencia académica del software utilizado, para uso académico, durante el periodo de un año, para continuar la investigación sobre el tema. Así, se ha determinado el problema inicial a ser tratado, que es la difuminación, disminución o limpieza de nubes y sombras a partir de imágenes satelitales. Se ha determinado también evaluar un área específico del departamento de Ucayali como zona de estudio, durante el periodo 2013-2015 entre los meses de julio-agosto, fechas en las que existe una mejor visibilidad. La aplicación del software CLASLITE con la zona de estudio ha sido concluida satisfactoriamente, pero el estudio en desarrollo se basa en realizar un propio software que realice las mismas funciones. Esta parte de la investigación queda fuera del escopo del presente informe, pues sigue en desarrollo como parte del trabajo de investigación de la Doctoranda Jacqueline Atoche Bravo.

#### 5 Experimentos Computacionales

En esta sección son presentados experimentos computacionales con los modelos propuestos para el problema de localización de puestos forestales, para tal se han considerado dos instancias y se han considerado diversos escenarios. Para las instancias se saben los datos de cada distrito, incluyendo sus coordenadas geográficas (latitud y longitud), obtenidas de dos formas: por aproximación y utilizando un software de información geográfica.

##### 5.1 Instancias

La primera instancia, que será denominada como **INST01** considera  $N = 1828$  distritos o puntos candidatos distribuidos según cada uno de los 24 departamentos del Perú. La Figura 1 muestra el mapa del Perú, allí los puntos negros representan la localización geográfica de los 1828 puntos candidatos a ser puesto forestal, así mismo, la Figura 2 muestra el mapa del Perú con cuadrados verdes que representan la cantidad de demanda por punto candidato, el color determina la cantidad de demanda, a mayor demanda, más oscuro es el punto, y a menor demanda, más claro.

La segunda instancia, que será denominada como **INST02** considera los distritos que presentaron pérdida de Bosque entre los años 2000-2014, ubicados en la Amazonía peruana, que son  $N = 370$  puntos candidatos distribuidos por departamentos, los cuales poseen información de deforestación que será cuantificada como demanda por puestos forestales.



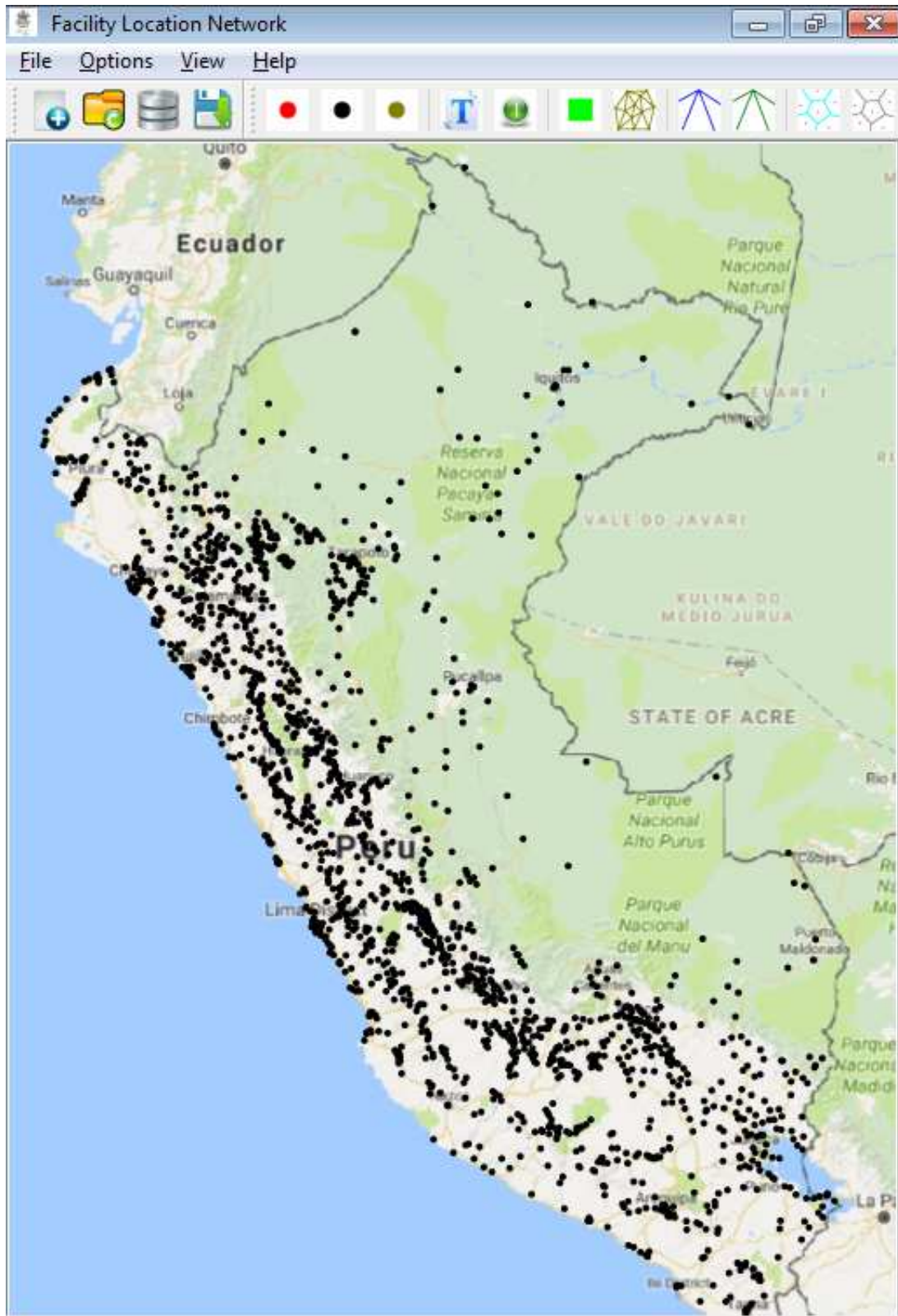


Figura 1: INST01: Localización de 1828 candidatos a puestos forestales

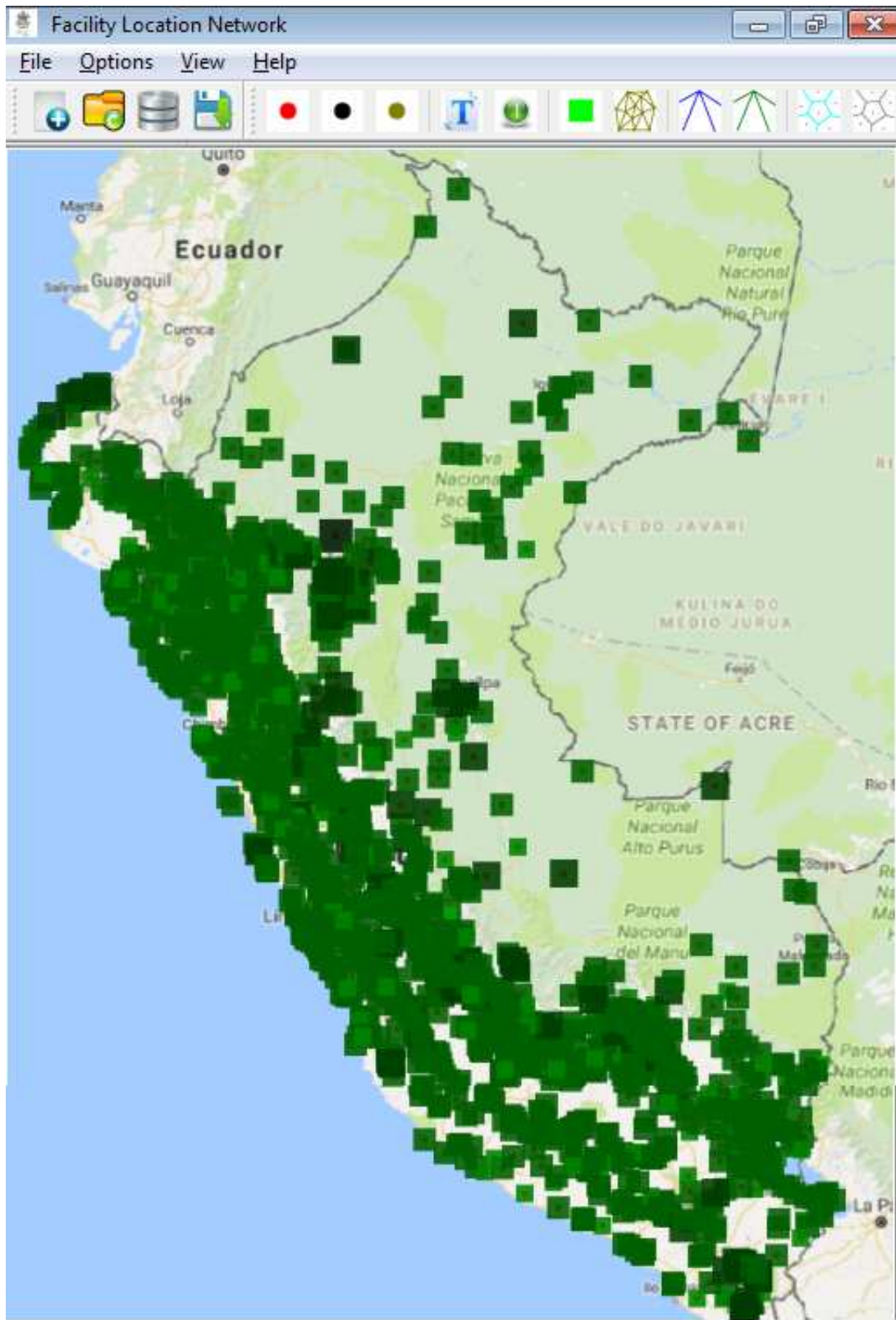


Figura 2: INST01: Demanda de 1828 candidatos a puestos forestales

Tabela 1: Departamentos con deforestación en la Amazonía peruana

Id	Departamento	Distritos	Distritos Afectados
1	Amazonas	84	84
5	Ayacucho	111	10
6	Cajamarca	123	19
8	Cusco	108	18
9	Huancavelica	94	4
10	Huanuco	76	25
12	Junin	123	28
13	La Libertad	83	3
16	Loreto	51	51
17	Madre de Dios	11	11
19	Pasco	28	9
20	Piura	64	5
21	Puno	109	17
22	San Martin	77	77
25	Ucayali	15	15

Cabe resaltar que la información sobre deforestación fue proporcionada solamente para los departamentos de la Amazonía peruana, cuyo detalle se muestra la Tabla 1.

La Figura 3 muestra el mapa del Perú, allí los puntos negros representan la localización geográfica de los 370 puntos candidatos a ser puesto forestal, así mismo, la Figura 4 muestra el mapa del Perú con cuadrados verdes que representan la cantidad de demanda ( $w_i$ ) por punto candidato, donde se ha cuantificado la demanda a través del valor del área de Pérdida de Bosque entre los años 2000 y 2014, nuevamente, el color determina la cantidad de demanda, a mayor demanda, más oscuro es el punto, y a menor demanda, más claro.

## 5.2 Data

El número de puestos y sedes forestales fue determinado según el número actual de puestos y sedes forestales a nivel nacional proporcionado por el SERFOR [30], que es de 194, como muestra la Figura 5, número que será usado como  $p$ -mediana en la instancia **INST01**. Así mismo, para el número de puestos forestales a ser considerado en la **INST02** se consideró también el número de puestos forestales por departamento, tomando como prioridad la ubicación de puestos forestales en lugares donde existe Pérdida de Bosque, por lo que el número determinado fue de 135.

La matriz distancia  $d[i, j]$  fue determinada usando el método de [1], que calcula la distancia a partir de las coordenadas geográficas (latitud y longitud) considerando el globo terrestre.

## 5.3 Implementación

El modelo de la  $p$ -mediana y el modelo  $p$ -mediana-variante utilizados como base en esta investigación fueron escritos en lenguaje GMLP (GNU MathProg Lenguaje) a través del editor de texto Crimson Editor y usando el *solver* del paquete GLPK (GNU Linear Programming Kit), software GLPSOL, versión 4.8, el método de solución utilizado fue el *intopt*, basado en el método simplex, método padrón para resolver problemas de programación entera y programación entera mixta.

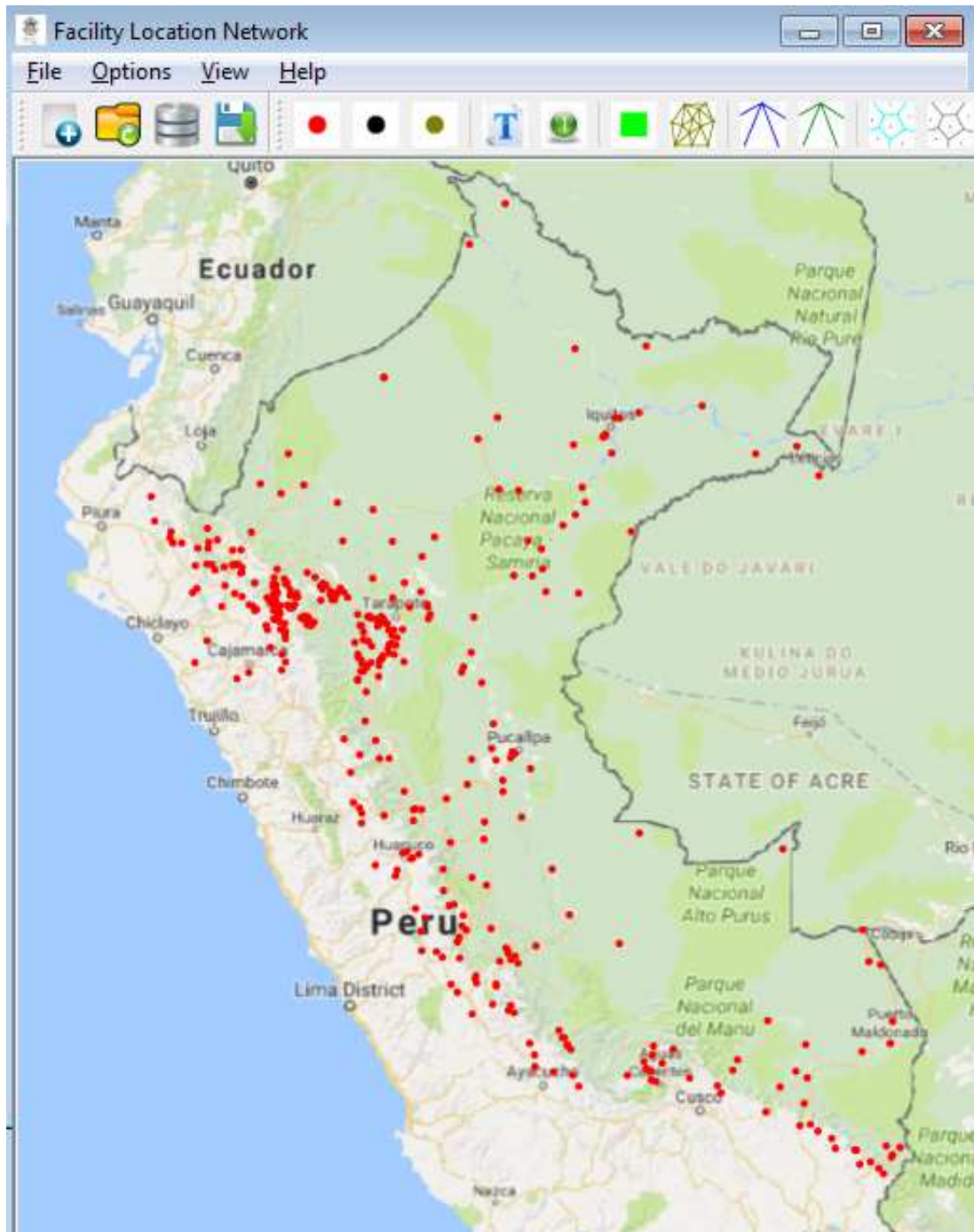


Figura 3: INST02: Localización de 370 candidatos a puestos forestales

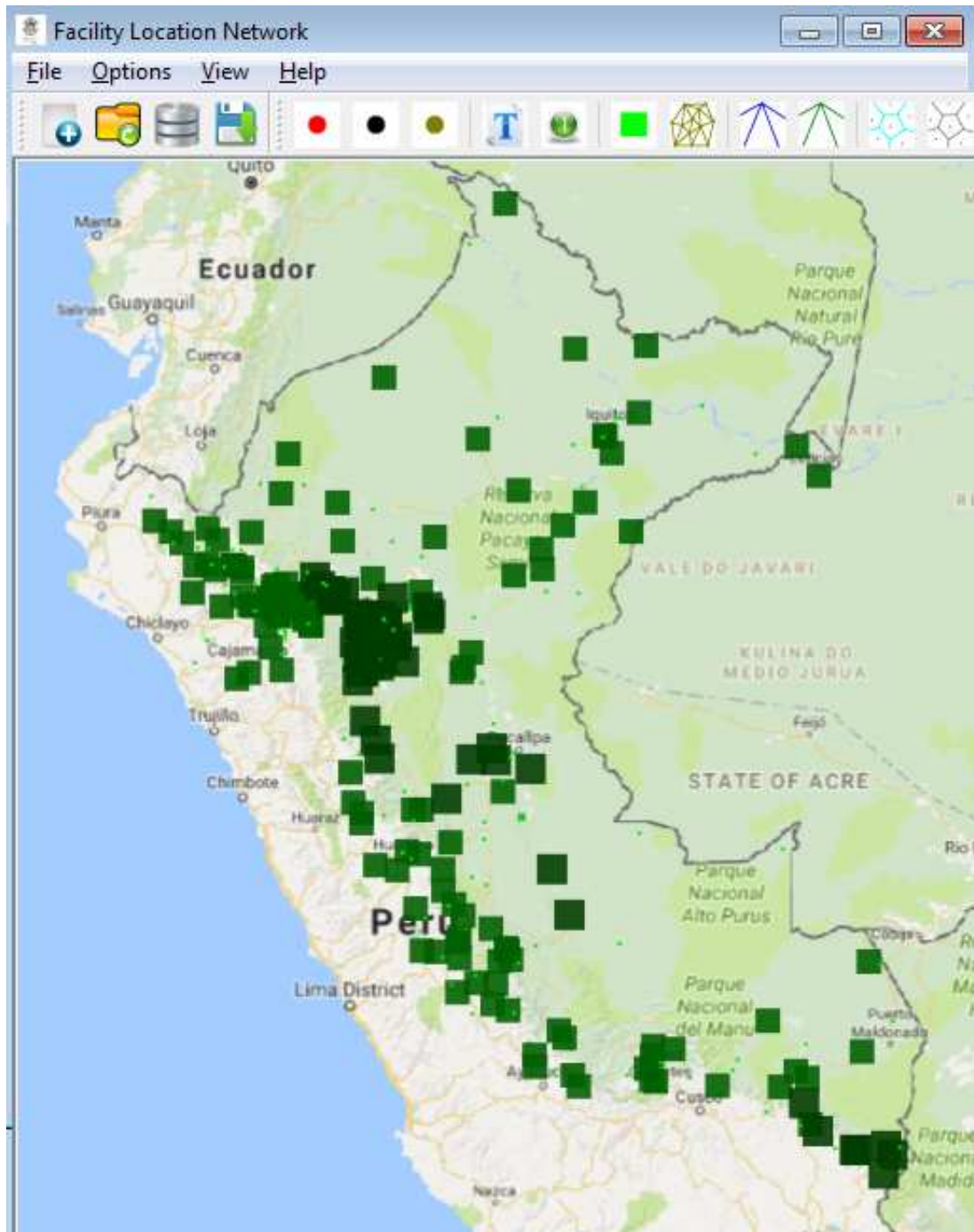


Figura 4: INST02: Demanda de 370 candidatos a puestos forestales



Figura 5: Puestos y Sedes forestales

Tabela 2: Resultados para **INST01**,  $N = 1928$ ,  $p = 194$ . Escenario 01

Id	Departamento	N	$p$	Número de variables	Número de restricciones	Tiempo de solución	Función Objetivo
1	Amazonas	84	9	7057	7056	0.5	28450645.26
2	Ancash	166	4	27557	27556	60.5	135816033.2
3	Apurímac	80	5	6401	6400	0.4	46305006.18
4	Arequipa	109	6	11882	11881	2.2	252409622.3
5	Ayacucho	111	4	12322	12321	2.1	163143690.5
6	Cajamarca	123	12	15130	15129	1.2	50808841.4
8	Cusco	108	5	11665	11664	9.3	194168240.9
9	Huancavelica	94	2	8837	8836	0.9	86144459.22
10	Huánuco	76	8	5777	5776	1.5	54333965.22
11	Ica	43	4	1850	1849	0	44414239.6
12	Junín	123	9	15130	15129	2.5	53823175.49
13	La Libertad	83	17	6890	6889	0.1	23261746.86
14	Lambayeque	38	5	1445	1444	0	13370602.12
15	Lima	171	9	29242	29241	6.3	78783739.29
16	Loreto	51	34	2602	2601	0	94776179.69
17	Madre de Dios	11	10	122	121	0	3161879.2
18	Moquegua	20	1	401	400	0	69607319.68
19	Pasco	28	5	785	784	0	23207216.71
20	Piura	64	6	4097	4096	0.2	70279882.94
21	Puno	109	8	11882	11881	1	175744672.9
22	San Martín	77	6	5930	5929	0.3	88211866.82
23	Tacna	27	3	730	729	0	27761515.13
24	Tumbes	13	2	170	169	0	6365313.52
25	Ucayali	15	15	226	225	0	0

El sistema de visualización gráfica mostrado fue implementado en el lenguaje C++, utilizando la herramienta Qt para interfaz gráfica y CGAL para los diagramas de Voronoi, usando una imagen del Google Maps. El experimento fue efectuado en un computador Intel PC Celeron con 2,7GHz y 512MB RAM, bajo el sistema operativo de 32 bits, Windows Vista.

#### 5.4 Resultados computacionales

Se han considerado diversos escenarios, en el primero, se ha considerado la instancia **INST01**, el modelo de la  $p$ -mediana y  $p = 194$  puestos y sedes forestales. Los datos fueron desagregados por departamento para su resolución, y fue considerado el error de agrupamiento para disminución de errores, esto para obtener una solución factible del problema a nivel nacional. La tabla 2 muestra los valores encontrados en cada etapa del proceso de solución del problema, incluyendo el tiempo de solución, el número de variables y número de restricciones generadas. Finalmente, se muestra el resumen de los resultados alcanzados en la Figura 6, donde, las líneas azules identifican la alocaación o atribución de cada punto candidato o de demanda a su puestos forestales escogido (mediana).

Para la resolución del segundo escenario ha considerado la instancia **INST01**, el modelo  $p$ -median-variante, y los  $p = 194$  puestos y sedes forestales. Los datos también fueron

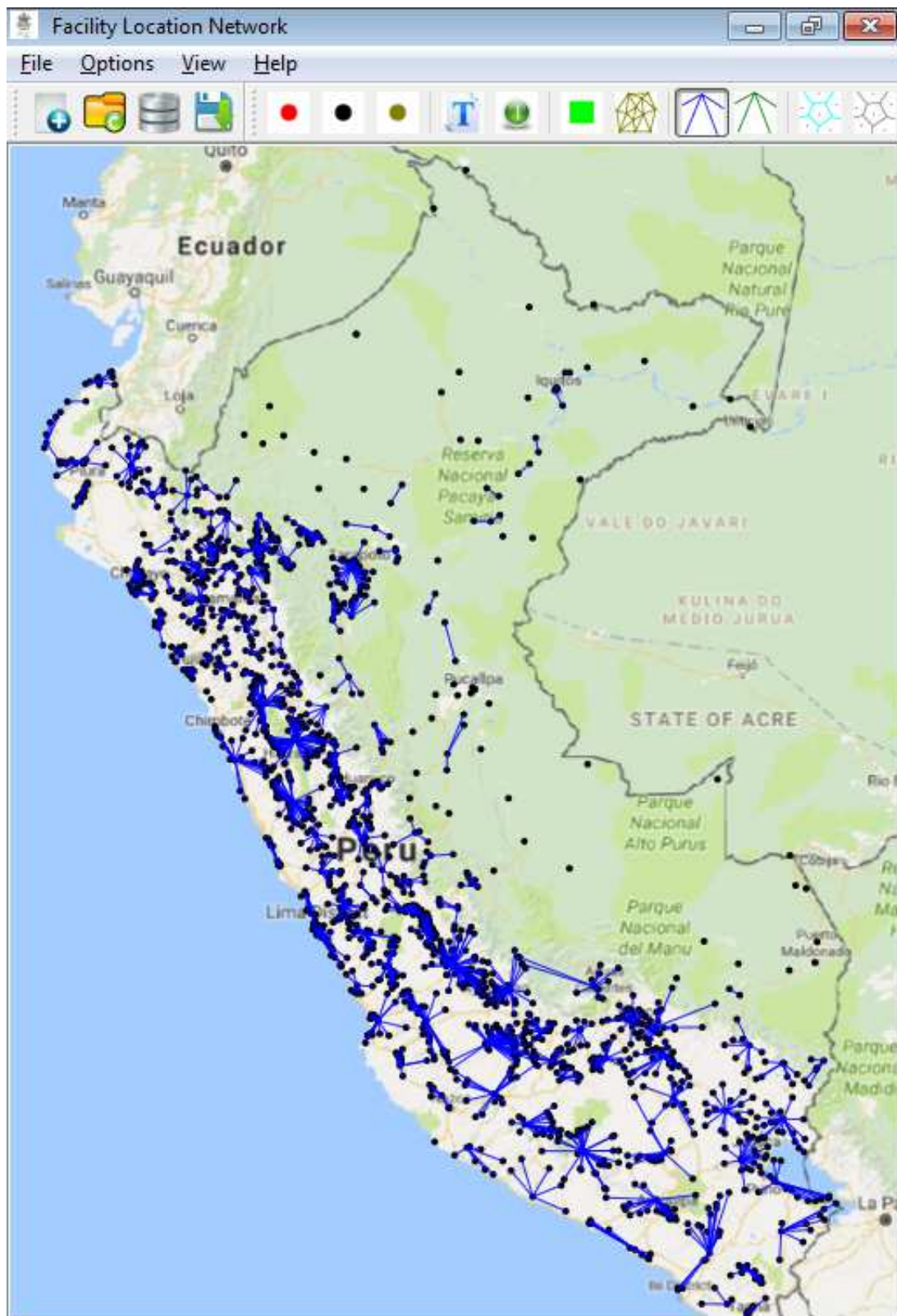


Figura 6: Resultados del Escenario 01 para INST01,  $p = 194$ : localización de puestos forestales



Tabela 3: Resultados del Escenario 02 para **INST01**,  $N = 1928$ ,  $p = 194$

Id	Departamento	N	$p$	Número de variables	Número de restricciones	Tiempo de solución	Función Objetivo
1	Amazonas	84	9	7057	7056	0.4	1082.97
2	Ancash	166	4	27557	27556	51.4	5433.16
3	Apurímac	80	5	6401	6400	0.4	1584.3
4	Arequipa	109	6	11882	11881	1.4	3307.29
5	Ayacucho	111	4	12322	12321	1.4	3546.99
6	Cajamarca	123	12	15130	15129	1.6	1988.22
8	Cusco	108	5	11665	11664	6.8	3087.76
9	Huancavelica	94	2	8837	8836	1.1	3705.58
10	Huánuco	76	8	5777	5776	1.4	1215.41
11	Ica	43	4	1850	1849	0	770.56
12	Junín	123	9	15130	15129	1.8	1520.4
13	La Libertad	83	17	6890	6889	0.2	844.95
14	Lambayeque	38	5	1445	1444	0	444.94
15	Lima	171	9	29242	29241	6.1	3189.49
16	Loreto	51	34	2602	2601	0	331.63
17	Madre de Dios	11	10	122	121	0	19.03
18	Moquegua	20	1	401	400	0	925.77
19	Pasco	28	5	785	784	0	363.38
20	Piura	64	6	4097	4096	0.1	1158.55
21	Puno	109	8	11882	11881	1.1	3123.38
22	San Martín	77	6	5930	5929	0.3	1429.66
23	Tacna	27	3	730	729	0	399.36
24	Tumbes	13	2	170	169	0	196.75
25	Ucayali	15	15	226	225	0	0

desagregados por departamento para su resolución, y fue considerado el error de agrupamiento para disminución de errores, esto para obtener una solución factible del problema a nivel nacional. La tabla 3 muestra los valores encontrados en cada etapa del proceso de solución del problema, incluyendo el tiempo de solución, el número de variables y número de restricciones generadas. Finalmente, se muestra el compilado de resultados a nivel nacional, como muestra la Figura 7, donde, las líneas azules identifican la alocaación o atribución de cada punto candidato o de demanda a su puestos forestales escogido (mediana).

Para la resolución del tercer escenario se ha considerado la instancia **INST01**, el modelo de la  $p$ -mediana y  $p = 194$  puestos y sedes forestales. Aquí, el problema se resuelve utilizando la heurística Maranzana, usando como datos iniciales los 194 disritos aleatorios, la solución óptima del método se alcanza en la iteración 37, en la tabla 4 muestra los valores encontrados en cada etapa del proceso de solución del problema. Las Figuras 8, 9 y 10 muestran las iteraciones 1, 15 y 37 respectivamente, en las figuras, las líneas azules identifican la alocaación o atribución de cada punto candidato o de demanda a su puestos forestales escogido (mediana).

Para la resolución del cuarto escenario se ha considerado la instancia **INST02**, los modelos de la  $p$ -mediana y  $p$ -mediana-variante y  $p = 135$  puestos y sedes forestales. La tabla 5 muestra el tiempo de solución, el número de variables y número de restricciones generadas. La tabla 6 muestra los distritos donde se sugiere la localización de un puesto o sede forestal y sus respectivas alocaaciones. Finalmente, se muestra el resumen de los

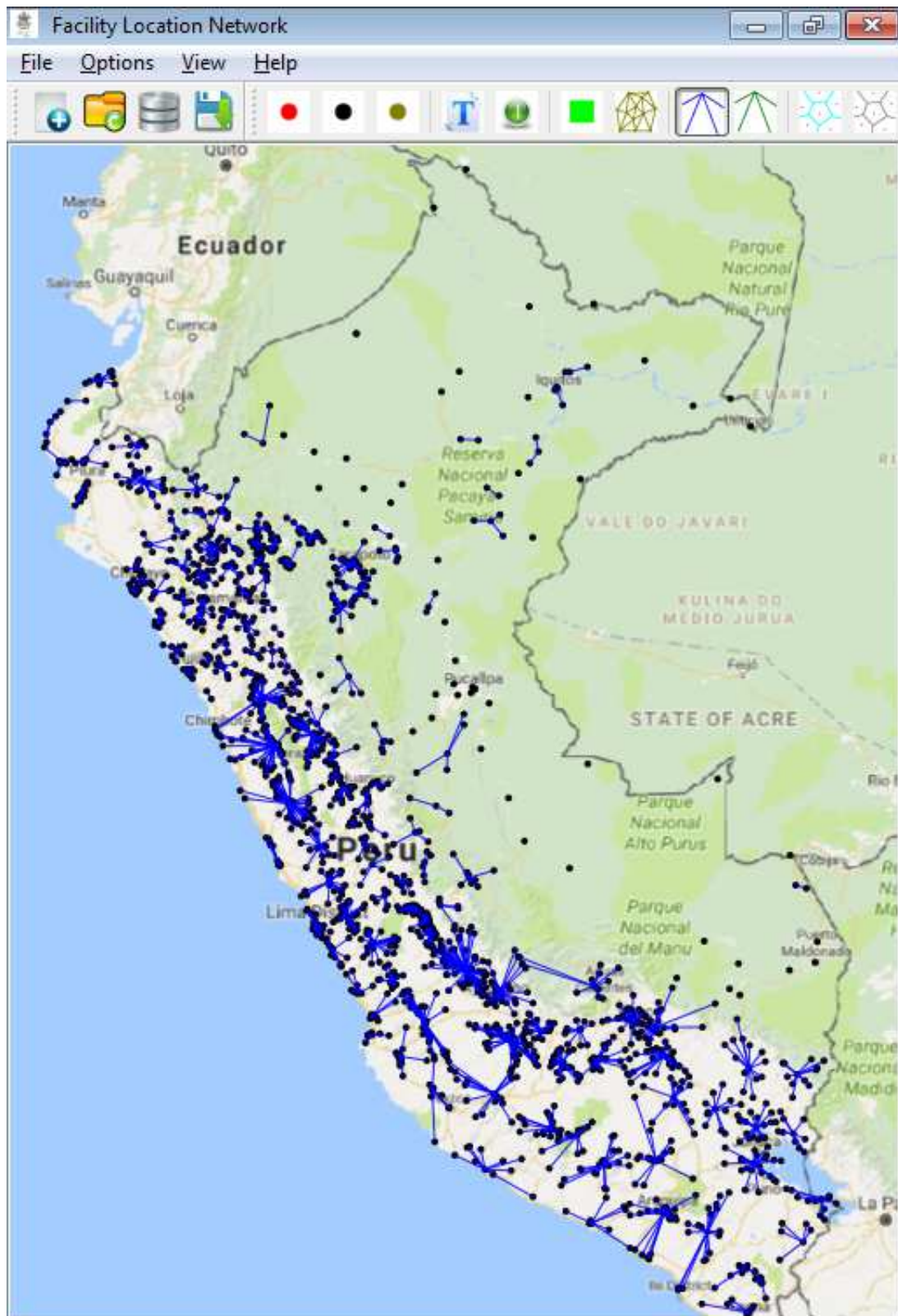


Figura 7: Resultado del Escenario 02 para INST01,  $p = 194$ : localización de puestos forestales sin demanda

Tabela 4: Resultados del Escenario 03 para **INST01**,  $N = 1928$ ,  $p = 194$ . Método Maranzana

Número de iteración	Función Objetivo
1	23985577.87
2	16500470.36
3	15416169.68
4	14359174.92
5	13999648.1
6	13869964.18
7	13713106.44
8	13595834.67
9	13565045.08
10	13520450.96
11	13404658.33
12	12775967.45
13	12025238
14	11662293.05
15	11474852.67
16	11382350.32
17	11270071.59
18	11045095.11
19	10857625.34
20	10754946.49
21	10667526.49
22	10630666.54
23	10599838.5
24	10579991.52
25	10561807.21
26	10545530.72
27	10539543.38
28	10535125.29
29	10528939.24
30	10524756.77
31	10522354.38
32	10521764.36
33	10518038.31
34	10512857.61
35	10509639.41
36	10509598.7
37	10509598.7

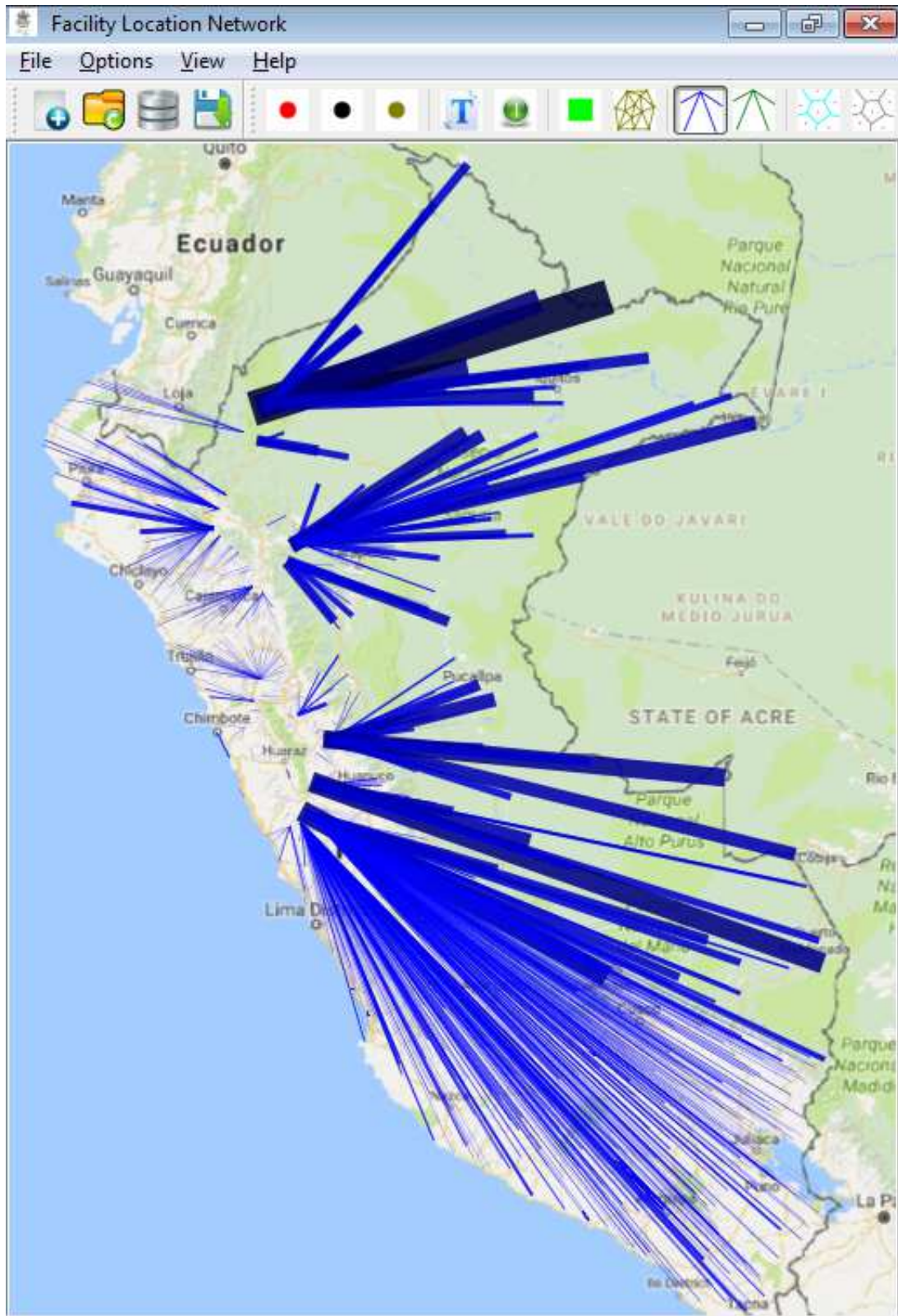


Figura 8: Atribución de  $p = 194$  puestos forestales, Método Maranzana, iteración 01

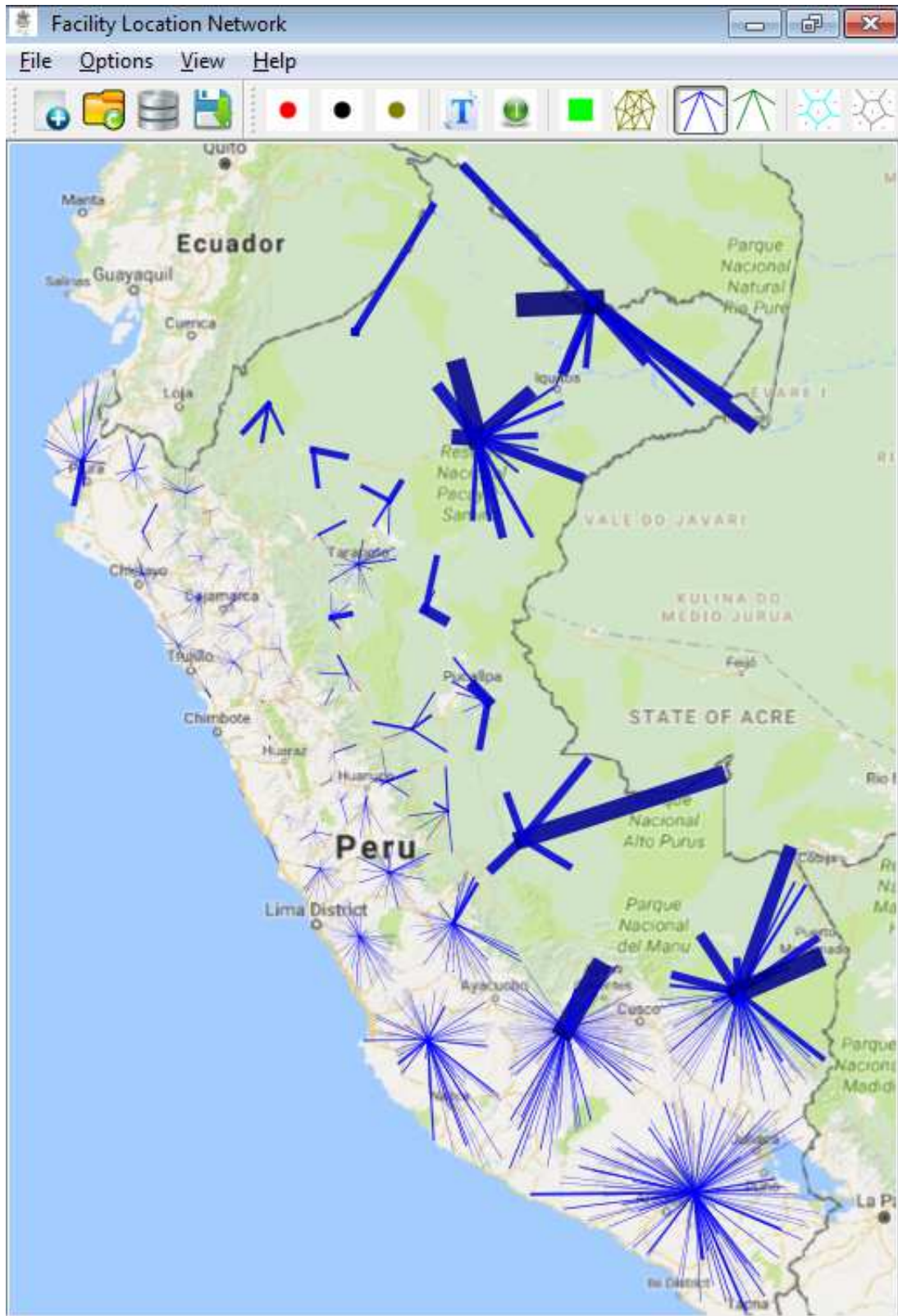


Figura 9: Atribución de  $p = 194$  puestos forestales, Método Maranzana, iteración 15

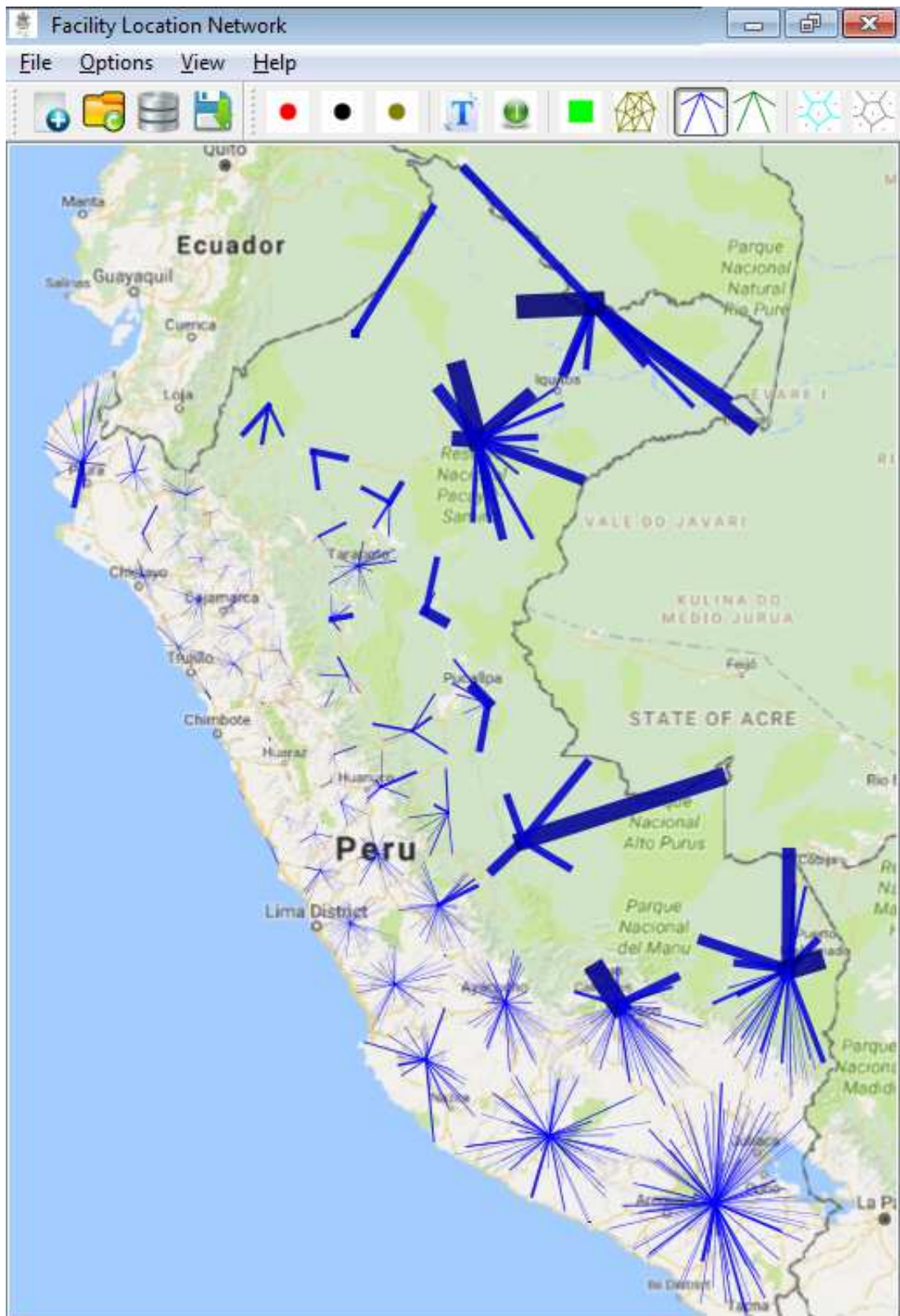


Figura 10: Atribución de  $p = 194$  puestos forestales, Método Maranzana, iteración 37

Tabela 5: Resultados para **INST01**,  $N = 1928$ ,  $p = 194$ . Escenario 01

Modelo	N	$p$	Número	Número	Tiempo de solución	Función Objetivo
p-median	370	135	136901	136900	114.3	374560.32
p-median-variante	370	135	136901	136900	323.0	3148.63

resultados alcanzados en la Figura 11, donde, las líneas azules identifican la asignación o atribución de cada punto candidato o de demanda a su puestos forestales escogido (mediana) y las líneas en turquesa identifican las áreas de cobertura para cada mediana, denominadas como Diagramas Voronoi [4], heurística desarrollada como en [2].

Tabela 6: Resultados para **INST02**,  $N = 370$ ,  $p = 135$ . Escenario 04

ID	Distrito	Alocaciones
010103	BALSAS	010103, 010106, 010111, 010517
010116	OLLEROS	010102, 010105, 010107, 010116, 010117
010118	SAN FRANCISCO DE DAGUAS	010104, 010114, 010118, 010120, 010121
010201	BAGUA	010201, 010202, 010203, 010204, 010206, 010701, 010702, 010704, 060802, 060812
010205	IMAZA	010205
010305	CUISPES	010301, 010302, 010304, 010305, 010306, 010307, 010308, 010309, 010310, 010312, 010705
010401	NIEVA	010401, 010402, 160703
010403	RIO SANTIAGO	010403
010502	CAMPORREDONDO	010502, 010512, 010513, 010515, 010706
010506	INGUILPATA	010101, 010504, 010505, 010506, 010508, 010509
010518	SAN JERONIMO	010303, 010311, 010501, 010510, 010516, 010518, 010520
010522	TINGO	010109, 010110, 010112, 010113, 010115, 010119, 010503, 010507, 010511, 010514, 010519, 010521, 010522
010610	SANTA ROSA	010601, 010602, 010603, 010604, 010605, 010606, 010607, 010608, 010609, 010610, 010611
050406	SANTILLANA	050401, 050402, 050406, 050501
050505	CHUNGUI	050502, 050505
060805	HUABAL	060801, 060803, 060805, 060806, 060906
060807	POMAHUACA	060804, 060807
060809	SALLIQUE	010703, 010707, 060808, 060809
060903	HUARANGO	060901, 060902, 060903, 060904
060905	NAMBALLE	060810, 060811, 060905
080408	YANATILE	080408, 080905
080906	QUELLOUNO	080901, 080902, 080906
080908	SANTA TERESA	080903, 080904, 080908, 080909, 081304
080910	PICHARI	050407, 050408, 050503, 050507, 080907, 080910
081103	CHALLABAMBA	080404, 081101, 081103, 081106, 170201
081203	CAMANTI	081203, 081209
100311	MARIAS	100311
100505	JIRCAN	100403, 100502, 100505, 100507, 100601
100605	LUYANDO	100602, 100603, 100604, 100605, 100606
100702	CHOLON	100702

100802	CHAGLLA	100103, 100104, 100801, 100802, 100803
100804	UMARI	100804, 100901, 100903, 250103
100902	CODO DEL POZUZO	100902, 100905
100904	TOURNAVISTA	100401, 100904
120124	PARIAHUANCA	090707, 090717, 090718, 120124, 120306
120203	ANDAMARCA	120135, 120203
120206	COMAS	120205, 120206, 120209
120303	PICHANAQUI	120303
120305	SAN RAMON	120301, 120302, 120305
120403	APATA	120403, 120418
120419	MONOBAMBA	120419
120603	LLAYLLA	120603, 120604, 120606, 120608
120605	PAMPA HERMOSA	120605
120607	RIO NEGRO	120601, 120602, 120607
120704	HUASAHUASI	120704, 120706
120708	SAN PEDRO DE CAJAS	120504, 120708
130306	UCUNCHA	130305, 130306
160103	FERNANDO LORES	160103
160105	LAS AMAZONAS	160104, 160105, 160402
160107	NAPO	160107
160109	PUTUMAYO	160109
160112	BELEN	160101, 160102, 160106, 160108, 160112, 160113
160114	TENIENTE MANUEL CLAVERO	160110, 160114
160202	BALSAPUERTO	160202
160206	LAGUNAS	160205, 160206, 160210
160211	TENIENTE CESAR LOPEZ ROJAS	160201, 160211
160302	PARINARI	160302, 160305
160304	TROMPETEROS	160303, 160304
160401	RAMON CASTILLA	160401, 160404
160403	YAVARI	160403
160501	REQUENA	160501
160503	CAPELO	160503, 160506
160505	MAQUIA	160505
160507	SAQUENA	160301, 160507, 160510
160509	TAPICHE	160502, 160504, 160508, 160509
160511	YAQUERANA	160511
160602	INAHUAYA	160602
160604	PAMPA HERMOSA	160601, 160604
160606	VARGAS GUERRA	160605, 160606
160702	CAHUAPANAS	160702
160704	MORONA	160701, 160704
160705	PASTAZA	160705, 160706
170102	INAMBARI	170102
170104	LABERINTO	170101, 170103, 170104
170202	FITZCARRALD	170202
170204	HUEPETUHE	170203, 170204
170302	IBERIA	170301, 170302, 170303, 250401
190102	HUACHON	190102, 190107
190301	OXAPAMPA	190301, 190302, 190306
190303	HUANCABAMBA	190303
190305	POZUZO	190304, 190305
190307	VILLA RICA	120304, 190307
200206	PACAIPAMPA	200201, 200206
200303	EL CARMEN DE LA FRONTERA	060907, 200301, 200303, 200307, 210303, 210308



210307	ITUATA	210304, 210307
210309	SAN GABAN	210309
211005	SINA	211005, 211201, 211206
211205	PHARA	210310, 211203, 211204, 211205
211207	SAN JUAN DEL ORO	211207, 211208, 211210
211209	ALTO INAMBARI	211209
220101	MOYOBAMBA	220101, 220104, 220106
220103	HABANA	220102, 220103
220105	SORITOR	220105
220201	BELLAVISTA	220201
220203	BAJO BIAVO	220202, 220203
220205	SAN PABLO	220205, 220304
220301	SAN JOSE DE SISA	220301, 220302
220305	SHATOJA	220303, 220305
220402	ALTO SAPOSOA	220402
220404	PISCOYACU	220401, 220403, 220404
220406	TINGO DE SAPOSOA	220204, 220405, 220406
220502	ALONSO DE ALVARADO	220502, 220805
220504	CAYNARACHI	220504
220506	PINTO RECODO	220506, 220509
220508	SAN ROQUE DE CUMBAZA	220508, 220912
220510	TABALOSOS	220510
220601	JUANJUI	220601
220603	HUICUNGO	220602, 220603, 220604
220605	PAJARILLO	220605
220702	BUENOS AIRES	220702, 220705
220704	PILLUANA	220704
220706	SAN CRISTOBAL	220206, 220701, 220703, 220706, 220707
220708	SHAMBOYACU	220708
220710	TRES UNIDOS	220709, 220710
220802	AWAJUN	220802
220804	NUEVA CAJAMARCA	220803, 220804, 220807, 220809
220806	POSIC	220801, 220806
220808	YORONGOS	010612, 220808
220903	CACATACHI	220501, 220505, 220507, 220511, 220903
220905	CHIPURANA	220905
220907	HUIMBAYOC	220907
220909	LA BANDA DE SHILCAYO	220901, 220908, 220909, 220910
220911	PAPAPLAYA	220503, 220906, 220911
220913	SAUCE	220902, 220904, 220913, 220914
221001	TOCACHE	221001
221003	POLVORA	130807, 221003
221005	UCHIZA	221002, 221004, 221005
250102	CAMPOVERDE	250101, 250102, 250105, 250107
250104	MASISEA	250104
250106	NUEVA REQUENA	160603, 250106
250201	RAYMONDI	250201, 250202
250203	TAHUANIA	250203, 250204
250301	PADRE ABAD	250301, 250302
250303	CURIMANA	250303

Un análisis a los datos mostrados en la Figura 5 a través de un software SIG, muestra que existen puestos y sedes forestales en el mismo distrito, a distancias muy cortas, que podrían ser unidos en la categoría “puesto-sede”, esto se da en los distritos: Tambopata

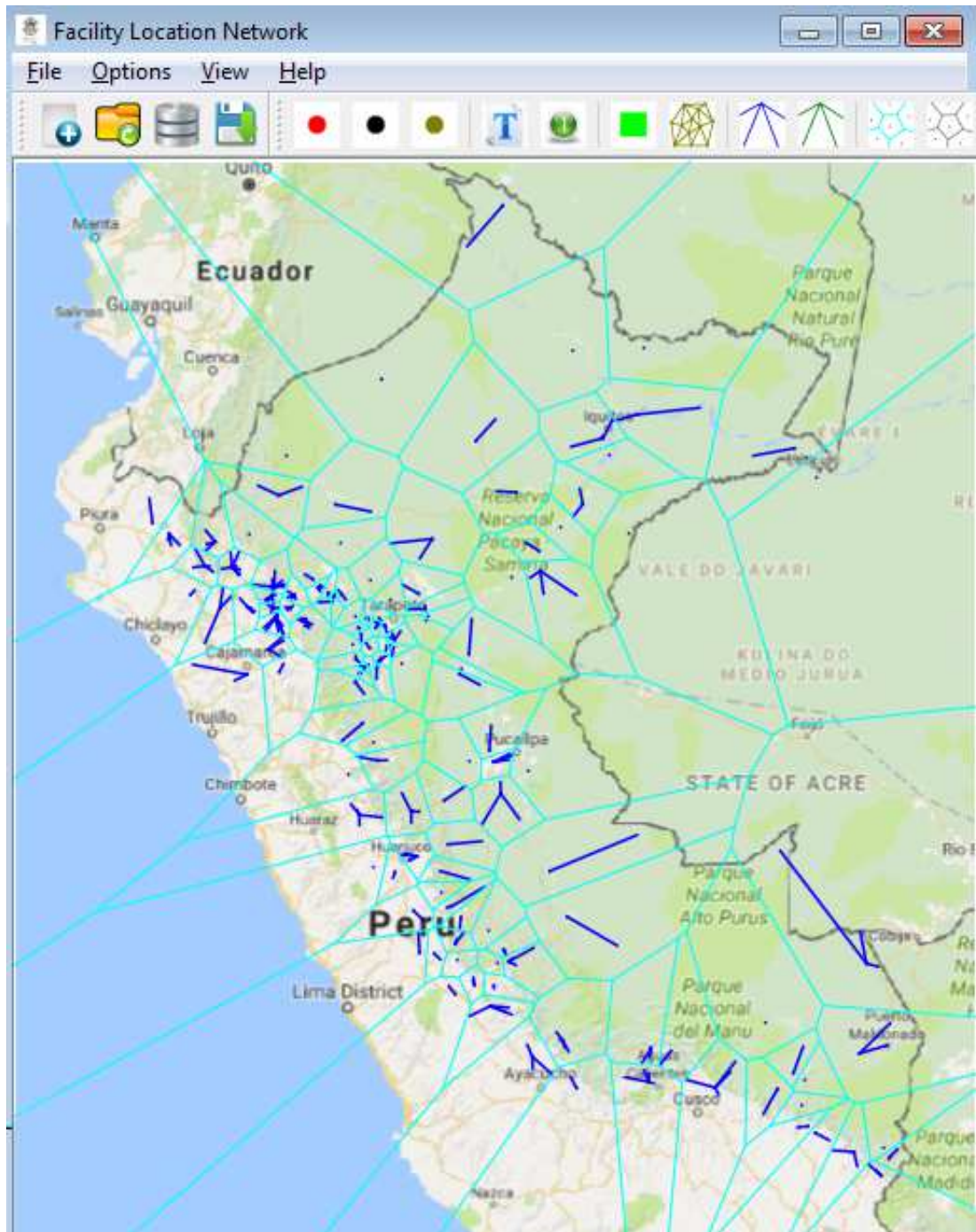


Figura 11: Escenario 04: Atribución de  $p = 135$  puestos forestales para **INST02**,  $p$ -median

Tabela 7: Traslado de Puestos de Control Forestal

ID	Del Puesto de Control	ID	Al Puesto de Control
120305	San Ramón	1200306	Vitoc
140308	Olmos	140307	Motupe
160201	Yurimaguas	160210	Santa Cruz
160305	Urarinas	160302	Parinari
160305	Urarinas	160206	Lagunas
160401	Ramón Castilla	160404	San Pablo
160501	Requena	160508	Soplin
230101	Tacna	230108	Pocollay
240101	Tumbes	240106	San Juan de la Virgen
250201	Raymondi	250203	Tahuania

(ID=170101), provincia Tambopata, departamento Madre de Dios; Juliaca (ID=211101), provincia San Roman, departamento Puno y Calleria (ID=250101), provincia Coronel Portillo, departamento Ucayali. Así mismo, existen distritos que poseen puestos y sedes al mismo tiempo, aquí se recomienda que las sedes permanezcan inalteradas y se reasignen los puestos al distrito más próximo, considerando las vías acuíferas y terrestres, estos son:

Sobre los resultados encontrados para la instancia **INST01**, no se puede hacer una comparación idónea entre los resultados a nivel nacional y los puestos y sedes actualmente existentes, ya que no se cuenta con un criterio documentado que pueda servir de ayuda para esto, sobre todo en lo que se refiere a deforestación, por lo que se pretende profundizar este tema en trabajos futuros, también, resultados usando el método GRASP fueron perjudicados pues este método no considera el peso o demanda de la región ( $w_i$ ).

Finalmente, comparando los resultados en la amazonía peruana 6 y los puestos de control actuales 1 se ha encontrado lo siguiente: 42 distritos continuarán siendo sedes y puestos forestales. La diferencia entre los otros puestos de control forestal radica en el peso que se ha asignado a las áreas que presentan Pérdida de Bosque, pues, con deforestación en curso, se ha asignado prioridad a estas, en lo que se refiere a puesto de control forestal.

Como trabajos futuros se espera incluir las distancias reales, respetando las vías terrestre y fluviales, con ayuda de software de herramientas GIS, ese trabajo está en desarrollo actualmente, por lo que se pretende ampliar la presente investigación incluyendo otros factores además de la demanda, como los costos fijos y variantes para la apertura y mantenimiento de puestos forestales.

## 6 Conclusiones

Los pasos seguidos durante el desarrollo del proyecto fueron:

- Se ha Desarrollado el curso de entrenamiento CLASlite;
- Se ha estudiado la base teórica para el procesamiento de imágenes, a fin de determinar las metodologías a ser usadas para el procesamiento de imágenes;
- Se ha desarrollado el estudio de agregación de datos, para minimizar errores en caso del estudio a nivel nacional;
- Se ha determinado las limitaciones del problema, como el tomar las distancias reales entre los distritos de cada departamento, esto para mejorar la calidad de los resultados de los experimentos computacionales;

- Se ha generado un estudio sobre el análisis de requisitos, el cual ha sido empleado para la obtención del análisis de requisitos del proyecto. Ese estudio fue presentado en el CLEI, obteniéndose una invitación para publicación en *journal*, el artículo fue publicado el 2016;
- Se ha incorporado al equipo de investigación a una alumna de doctorado, con la finalidad de investigar el problema encontrado en el área de procesamiento de imágenes, y a un colaborador externo, con la finalidad de trabajar con Sistemas de Información Geográfica, para conseguir un resultado con mayor aproximación, como muestran los resultados experimentales;
- Se han desarrollado diversas heurísticas para poder obtener la solución del problema a nivel nacional;
- Se han estudiado diversos escenarios con la finalidad de ampliar y mejorar la visibilidad de resultados.
- Los datos utilizados en el presente proyecto están disponibles para su estudio a través de la página web del IMCA: <http://www.imca.edu.pe/portal/index.php>.

## 7 Agradecimientos

Agradezco el apoyo recibido por parte de todos los miembros del IMCA-UNI, que fueron parte vital para el desarrollo del proyecto, así mismo, agradezco el financiamiento obtenido a través del Fondecyt.

## Referências

- [1] ALZAMORA, G. G. S. *Estratégias de localização de hubs para o sistema de transporte aéreo brasileiro*. D. sc. thesis, PUC-Rio, RJ, 2013.
- [2] ALZAMORA, G. S., RAUPP, F. M. P., Y PIZZOLATO, N. D. Localização e alocação de centros de saúde: Estudo de caso em Ácora, Puno, Peru. In *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO)* (Ubatuba, SP, 2011).
- [3] ASNER, G. P., KNAPP, D. E., BALAJI, A., Y PÁEZ-ACOSTA, G. Automated mapping of tropical deforestation and forest degradation: Claslite. *Journal of Applied Remote Sensing* 3 (2009), 1–24.
- [4] AURENHAMMER, F. Voronoi diagrams - a survey of a fundamental geometric data structure. *ACM Computing Surveys* 23 (1991), 345–405.
- [5] BRANDEAU, M. L., Y CHIU, S. S. An overview of representative problems in location research. *Management Science* 35, 6 (1989), 645–674.
- [6] ŞAHIN, G., Y SÜRAL, H. A review of hierarchical facility location models. *Computers & Operations Research* 34, 8 (2007), 2310–2331.
- [7] CURRENT, J. R., Y SCHILLING, D. A. Analysis of errors due to demand data aggregation in the set covering and maximal covering location problems. *Geographical Analysis* 22 (1990), 116–126.
- [8] DREZNER, Z., Ed. *Facility Location: A Survey of Applications and Methods*. Springer Series in Operations Research. Springer Verlag, New York, 1995.
- [9] DREZNER, Z., Y HAMACHER, H. W., Eds. *Facility Location: Applications and Theory*. Springer, New York, 2004.
- [10] FARAHANI, R. Z., Y HEKMATFAR, M., Eds. *Facility Location: Concepts, Models, Algorithms and Case Studies: Contributions to Management Science*. Physica-Verlag Heidelberg, 2009.

- [11] FARAHANI, R. Z., STEADIESEIFI, M., Y ASGARI, N. Multiple criteria facility location problems: A survey. *Applied Mathematical Modelling* 34 (2010), 1689–1709.
- [12] HAKIMI, S. L. Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. *Operations Research* 12 (1964), 450–459.
- [13] KARIV, O., Y HAKIMI, S. L. An algorithmic approach to network location problems. II: The  $p$ -medians. *SIAM Journal of Applied Mathematics* 37 (1979), 539–560.
- [14] KLOSE, A., Y DREXL, A. Facility location models for distribution system design. *European Journal of Operational Research* 162 (2005), 4–29.
- [15] LUSTOSA, L. J., ALZAMORA, G. G. S., RAUPP, F. M. P., Y DA CAMARA PEREIRA, C. E. Difficulties and remedies in solving a bulk product logistic system model. In *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO)* (2014), pp. 1567–1575.
- [16] MAKHORIN, A. Glpk, the gnu linear programming kit. [www.gnu.org](http://www.gnu.org), 2016.
- [17] MARANZANA, F. On the location of supply points to minimize transport costs. *Operations Research Quarterly* 13 (1964), 261–270.
- [18] MELO, M. T., NICKEL, S., Y DA GAMA, F. S. Facility location and supply chain management - a review. *European Journal of Operational Research* 196, 2 (2009), 401–412.
- [19] MINAGRI. Recurso forestal. <http://www.minagri.gob.pe/portal/49-sector-agrario/recurso-forestal>, 2016.
- [20] MINAM, Y MINAGRI. El Perú de los bosques, 2011.
- [21] NICKEL, S., Y PUERTO, J. *Location Theory: A Unified Approach*. Springer, Germany, 2005.
- [22] OWEN, S. H., Y DASKIN, M. S. Strategic facility location: A review. *European Journal of Operational Research* 111, 3 (1998), 423–447.
- [23] PIZZOLATO, N. D., RAUPP, F. M. P., Y ALZAMORA, G. S. Revisão de desafios aplicados em localização com base em modelos da  $p$ -mediana e suas variantes. *Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento(PODES)* 4, 1 (2012), 13–42.
- [24] REESE, J. Solution methods for the  $p$ -median problem: An annotated bibliography. *Networks* 48, 3 (2006), 125–142.
- [25] RESENDE, M. G. C., Y RIBEIRO, C. C. Greedy randomized adaptive search procedures. *Handbook of Metaheuristics* (2003), 219–249.
- [26] RESENDE, M. G. C., Y WERNECK, R. F. A fast swap-based local search procedure for location problems. *Annals of Operations Research* 150 (2007), 205–230.
- [27] REVELLE, C. S., Y EISELT, H. A. Location analysis: A synthesis and survey. *European Journal of Operational Research* 165, 1 (2005), 1–19.
- [28] REVELLE, C. S., EISELT, H. A., Y DASKIN, M. S. A bibliography for some fundamental problem categories in discrete location science. *European Journal of Operational Research* 184 (2008), 817–848.
- [29] SALA DE OBSERVACIÓN. Proyecto monitoreo de la deforestación en la región Amazónica, 2016.
- [30] SERFOR. Servicio forestal y de fauna silvestre. Internet, 2017. [www.serfor.gob.pe](http://www.serfor.gob.pe).
- [31] SNYDER, L. V. Facility location under uncertainty: A review. *IIE Transactions* 38, 1 (2006), 537–554.