INV. 177

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

LOCALIZACION OPTIMA DE RECURSOS Y TRANSPORTE DE CARGA PARA ORGANISMOS DE PROTECCIÓN CIVIL

CARLOS ALBERTO AHUMADA MATURANA

Memoria para optar al título de
Ingeniero Civil Industrial, con Diploma en Ingeniería Mecánica

Profesor Supervisor:
DR. VLADIMIR MARIANOV

Santiago de Chile, 2003

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA
Departamento de Mecánica

LOCALIZACION OPTIMA DE RECURSOS Y TRANSPORTE DE CARGA PARA ORGANISMOS DE PROTECCIÓN CIVIL

CARLOS ALBERTO AHUMADA MATURANA

Memoria presentada a la Comisión integrada por los profesores:

DR. VLADIMIR MARIANOV

DR. ALBERTO MATURANA

DR. JOSE MONTECINOS

Para completar las exigencias del título de
Ingeniero Civil Industrial, con Diploma en Ingeniería Mecánica

Santiago de Chile, 2003

Dedico esta memoria a mi Madre por su incansable apoyo, a mi Padre por enseñarme el camino hacia la ciencia e instarme a participar en él y a mis hermanas a las que adoro.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

LOCALIZACION OPTIMA DE RECURSOS Y TRANSPORTE DE CARGA PARA ORGANISMOS DE PROTECCIÓN CIVIL

CARLOS ALBERTO AHUMADA MATURANA

Memoria para optar al título de
Ingeniero Civil Industrial, con Diploma en Ingeniería Mecánica

Profesor Supervisor:
DR. VLADIMIR MARIANOV

Santiago de Chile, 2003

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA
Departamento de Mecánica

LOCALIZACION OPTIMA DE RECURSOS Y TRANSPORTE DE CARGA PARA ORGANISMOS DE PROTECCIÓN CIVIL

CARLOS ALBERTO AHUMADA MATURANA

Memoria presentada a la Comisión integrada por los profesores:

DR. VLADIMIR MARIANOV

DR. ALBERTO MATURANA

DR. JOSE MONTECINOS

Para completar las exigencias del título de
Ingeniero Civil Industrial, con Diploma en Ingeniería Mecánica

Santiago de Chile, 2003

Dedico esta memoria a mi Madre por su incansable apoyo, a mi Padre por enseñarme el camino hacia la ciencia e instarme a participar en él y a mis hermanas a las que adoro.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

LOCALIZACION OPTIMA DE RECURSOS Y TRANSPORTE DE CARGA PARA ORGANISMOS DE PROTECCIÓN CIVIL

CARLOS ALBERTO AHUMADA MATURANA

Memoria para optar al título de
Ingeniero Civil Industrial, con Diploma en Ingeniería Mecánica

Profesor Supervisor:
DR. VLADIMIR MARIANOV

Santiago de Chile, 2003

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA
Departamento de Mecánica

LOCALIZACION OPTIMA DE RECURSOS Y TRANSPORTE DE CARGA PARA ORGANISMOS DE PROTECCIÓN CIVIL

CARLOS ALBERTO AHUMADA MATURANA

Memoria presentada a la Comisión integrada por los profesores:

DR. VLADIMIR MARIANOV

DR. ALBERTO MATURANA

DR. JOSE MONTECINOS

Para completar las exigencias del título de
Ingeniero Civil Industrial, con Diploma en Ingeniería Mecánica

Santiago de Chile, 2003

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

LOCALIZACION OPTIMA DE RECURSOS Y TRANSPORTE DE CARGA PARA ORGANISMOS DE PROTECCIÓN CIVIL

CARLOS ALBERTO AHUMADA MATURANA

Memoria para optar al título de
Ingeniero Civil Industrial, con Diploma en Ingeniería Mecánica

Profesor Supervisor:
DR. VLADIMIR MARIANOV

Santiago de Chile, 2003

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA
Departamento de Mecánica

LOCALIZACION OPTIMA DE RECURSOS Y TRANSPORTE DE CARGA PARA ORGANISMOS DE PROTECCIÓN CIVIL

CARLOS ALBERTO AHUMADA MATURANA

Memoria presentada a la Comisión integrada por los profesores:

DR. VLADIMIR MARIANOV

DR. ALBERTO MATURANA

DR. JOSE MONTECINOS

Para completar las exigencias del título de
Ingeniero Civil Industrial, con Diploma en Ingeniería Mecánica

Santiago de Chile, 2003

Dedico esta memoria a mi Madre por su incansable apoyo, a mi Padre por enseñarme el camino hacia la ciencia e instarme a participar en él y a mis hermanas a las que adoro.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer sinceramente al Dr. Vladimir Marianov, profesor supervisor de esta memoria quién tuvo la paciencia de guiar, revisar y potenciar este trabajo. También es el responsable de inspirar en mi, el estudio y las aplicaciones de la localización óptima de recursos, materias que realmente modificaron mi forma de pensar.

Agradezco también al Director de la Oficina Nacional de Emergencia, Dr. Alberto Maturana por su dirección y apoyo esencial a este trabajo, así como a un grupo de profesionales que trabajan en esa oficina por sus valiosos datos y ayuda.

Por último, extiendo también mis agradecimientos al Dr. José Montecinos por revisar y participar en la comisión evaluadora de este trabajo.

INDICE GENERAL

Pág.

DEDICATORIA ii

AGRADECIMIENTOS iii

INDICE DE TABLAS vi

INDICE DE FIGURAS vii

RESUMEN ix

I. INTRODUCCION 1

II. ADMINISTRACION DE LA AYUDA 2

III. SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA EN LA ONEMI 5

3.1 Funciones del Laboratorio de S.I.G. 6

3.2 Definición de parámetros 6

3.3 Aplicabilidad de los S.I.G. en ONEMI 8

3.3.1 Areas de desarrollo 8

IV. APLICACIONES Y USO DEL PROGRAMA SIG ARCVIEW 11

4.1 Aplicaciones 11

4.2 Uso del ArcView 12

4.3 Almacenamiento de vínculos 27

4.4 Desplegar resultados o Mapas Temáticos 28

V. MODELACION DEL PROBLEMA 34

VI. IMPLEMENTACION COMPUTACIONAL 44

6.1 Solver 46

VII. SIMULACION DE UN CASO REAL 47

7.1 Descripción General 47

7.2 Fase I 50

7.3 Fase II 57
7.3.1 Métodos de Transporte 58
7.3.2 Nodos Servidores 60
7.4 RESULTADOS 61
7.4.1 Interpretación Gráfica 61
7.4.2 Costos 62

A N E X O S 65

ANEXO A : Experiencias de aplicación de los SIG en ONEMI 66

ANEXO B : Programa de resolucion matemática 68

ANEXO C : Camino más corto Coquimbo - Combarbalá 72

ANEXO D : Camino más corto Coquimbo - Combarbalá actualizado 75

ANEXO E : Camino más corto a Punitaqui, Montepatria, Ovalle y Vicuña. 78

ANEXO F : Solucion final 88

ANEXO G : Solucion final modificada 91

INDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 7.1: Distancia entre nodos en km. 50

Tabla 7.2: Matriz de distancias mínimas Mj en Km. 57

Tabla 7.3: Demanda de cajas de alimentos por localidades. 58

Tabla 7.4: Demanda en toneladas de alimentos por localidades. 58

Tabla 7.5: Costo de transporte por tipo de camión. 59

Tabla 7.6: Costo de habilitación de puntos de transferencia. 60

Tabla 7.7 Costos de Transporte 62

Tabla 7.8 Costos de transporte del caso base modificado. 64

INDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 4.1 Nuevo Tema..... 13

Figura 4.2: Menu de archivos para nuevo tema. 14

Figura 4.3: Elementos Point. 15

Figura 4.4: Creación de nuevo campo..... 16

Figura 4.5: Tabla de nuevo campo. 17

Figura 4.6: Edición de datos en nuevo campo. 17

Figura 4.7: Tema de Líneas. 18

Figura 4.8: Tolerancia. 19

Figura 4.9: Regla de Separación. 21

Figura 4.10: Carga de Base de Datos. 23

Figura 4.11: Base de datos cargada. 24

Figura 4.12: Bases de datos a unir..... 25

Figura 4.13: Bases de datos unida. 26

Figura 4.14: Tipos de Relaciones. 27

Figura 4.15: Tipos de leyendas..... 29

Figura 4.16: Mapa temático de valor único..... 30

Figura 4.17: Intervalo de clases..... 32

Figura 4.18: Mapa Temático de símbolo graduado..... 33

Figura 5.1: Sistema Básico..... 34

Figura 5.2: Sistema con nodo principal M. 39

Figura 6.1: Esquema operacional del sistema. 45

Figura 7.1: Red principal de caminos a considerar. 49

Figura 7.2: Camino más corto Coquimbo - Combarbalá. 51

Figura 7.3: Camino más corto Coquimbo - Combarbalá actualizado. 52

Figura 7.4: Camino más corto a Punitaqui. 53

Figura 7.5: Camino más corto Monte Patria. 54

Figura 7.6: Camino más corto Ovalle. 55

Figura 7.7: Camino más corto Vicuña. 56

Figura 7.8: Resultado Final 61

Figura 7.9: Resultado Sin Restricción de camino. 63

RESUMEN

Este trabajo trata de la formulación de una metodología y un posterior desarrollo de una herramienta capaz de generar optimizaciones para el problema de transporte de ayuda en casos de situaciones de emergencia.

Para realizar esta tarea se trabajó en tres grandes áreas. La primera consiste en describir en forma detallada el funcionamiento de un sistema de información geográfico y la interacción con otras herramientas computacionales. Con esto se logra explorar todas las potencialidades de estos sistemas, describir su funcionamiento e integrar en forma efectiva un proceso que logre funcionar en forma adecuada utilizando las potencialidades de las bases de datos, un programa solver matemático y un sistema geográfico. En consecuencia, se obtiene la potencia del cálculo de modelos matemáticos con la flexibilidad y capacidad de despliegue que otorgan los sistemas GIS.

En la segunda parte se describe y desarrolla un modelo capaz de resolver el problema planteado. Para la resolución de este, se consideran desarrollos en Localización Optima de Recursos, construyendo paso a paso un modelo que en la medida que aumenta su complejidad, va incorporando restricciones y conceptos, los cuales llevan a obtener un sistema capaz de resolver el problema planteado, aquí se discute la conveniencia de incorporar cada modificación y la consecuencia en el resultado. Este tendrá la estructura de un modelo lineal de programación entera, cuyas variables y resultados reflejarán la realidad que se desea modelar y permitirán obtener una resolución que se visualizará a través del GIS.

Por último, se efectúa una aplicación del sistema completo. Para esto se seleccionó un evento que fuera de una magnitud importante y que permitiera un acceso adecuado al conjunto de datos requeridos. Así, se simula una operación sobre el escenario del terremoto que afectó la región norte del país el 14 de octubre de 1997 (terremoto de Punitaqui). Dado la extensión del análisis, este se aborda para el problema específico de la distribución de alimentos. Se procedió a recopilar datos

tanto numéricos como descriptivos a nivel geográfico lo que permitió apreciar el funcionamiento del sistema y sus limitaciones.

Como conclusión se demuestra que el sistema funciona efectivamente en todas sus partes, es decir que actúa y se comporta de manera esperada; permitiendo una adecuada visualización en el sistema GIS, operando en forma efectiva las bases de datos y obteniendo resultados del modelo matemático que optimizan el problema planteado respetando las restricciones incorporadas y la topología de la red.

I. INTRODUCCION

La presente Memoria se centra en la aplicación de métodos de Localización Optima de Recursos y un sistema de Información Geográfica, a la solución del complejo problema de optimizar el costo de distribución de ayuda material, enviada por el gobierno, a un área geográfica determinada de nuestro país, cuando allí se produce una situación de emergencia o desastre que compromete a su población.

La idea base de este proyecto consiste en que la ONEMI, organismo dependiente del Ministerio del Interior, no solo entregue ayuda material, si no que agregue el valor de poder traspasar a las gobernaciones provinciales la logística necesaria para distribuir la ayuda. Esto redundará en un uso más eficiente de los recursos (camiones, combustible, personal, etc), lo cual se traducirá en un mayor poder de ayuda.

Se califica como ayuda, al suministro, consistente exclusivamente en elementos materiales, que permiten solucionar o paliar la carencia de aquellos destruidos por el desastre, tales como habitaciónes en forma de casas prefabricadas, colchones, ropa de abrigo, víveres no perecibles, etc.

No se consideran aquí ni aquella ayuda que puede calificarse como socorro, como son los casos en que esté en peligro la vida humana, ni la asistencia médica. Producida la emergencia, la autoridad correspondiente enviará toda la ayuda material posible, la que debe ser transportada para su distribución y hecha llegar hasta las localidades que la necesitan. Esta ayuda no es instantánea y puede completarse en un plazo razonable, por lo cual el tiempo no se considera como variable.

II. ADMINISTRACION DE LA AYUDA

El gobierno creó la Oficina Nacional de Emergencia (ONEMI) dependiente del Ministerio del Interior, como la entidad operativa que coordina y distribuye, entre otras muchas funciones, la ayuda gubernamental a los centros poblados en los casos en que la localidad es azotada por una emergencia, desastre o catástrofe.

Una emergencia, muchas veces deja a la población sin hogar, sin alimentos y en precarias condiciones sanitarias. La ONEMI actúa entonces, distribuyendo ayuda material consistente en casas prefabricadas, ropa de abrigo, alimentos, colchones y frazadas. Toneladas de carga deben ser entonces transportadas desde distintos puntos del país hacia la zona amagada y es prácticamente imposible, realizarlo en un corto plazo, cuando las circunstancias son siempre cambiantes, un análisis que permita apoyar decisiones que apunten, además, a una optimización del costo.

La ONEMI ha determinado que la distribución de la ayuda fluirá por el eje del Gobierno Interior (Intendencias y Gobernaciones), desde donde será distribuida hasta las localidades habitadas que se encuentran en el territorio comprendido por la comuna.

Cuando sucede una emergencia, la información llega de distintas fuentes a distintos organismos como: Direcciones de Emergencias Comunales, Provinciales y Regionales.

Por este motivo, la ONEMI es la primera entidad que realiza una evaluación de la cuantía y extensión de los daños provocados por la emergencia.

A medida que se recibe la información, de inmediato se ponen en acción los mecanismos de evaluación y comienza la determinación de la ayuda necesaria.

La distribución de la ayuda debe realizarse dentro de un criterio de optimización de los recursos, y entre los recursos susceptibles de optimizar está el costo, tanto del transporte como del acopio de la ayuda a distribuir.

El óptimo económico será aquél que minimice el costo total del transporte desde el gobierno regional o provincial hacia las localidades amagadas, con o sin la utilización de bodegas intermedias. La solución del problema deberá indicar además, la conveniencia de instalar bodegas o recintos que se habilitarían provisoriamente en determinadas localidades, habilitando escuelas y postas o construyendo bodegas provisorias, con el objeto de acopiar la ayuda, la que será posteriormente distribuida hasta otras localidades.

La información necesaria para el análisis, tiene dos partes; una que es permanente y está constituida por las rutas de comunicación terrestre, y la otra es la información que nace de la evaluación de los daños provocados por la catástrofe, que incluye la cuantificación de los damnificados, la extensión de la ayuda y los caminos hábiles que se pueden utilizar.

Hasta los agentes, llegará la información suficiente, que les permitirá una rápida evaluación de la situación y las necesidades de ayuda

Toda esta información, llevará a los agentes a tomar decisiones de cantidad y tipo de ayuda a entregar. Es aquí donde el presente trabajo realiza un aporte, creando un sistema computacional que, a partir de información ingresada a un sistema geográfico de datos, permita, de una forma sencilla, obtener una solución eficiente al problema de transportar esta ayuda. Esto se realizará utilizando modelos de localización óptima de recursos, que operarán de forma transparente para el usuario, liberándolo así de la operación de modelos que necesitan de personas con especialización en estos temas. Toda la implementación de la solución, está pensada en términos que pueda ser operada a través del laboratorio GIS que posee ONEMI y con computadores estándares (PC).

Una vez obtenida la solución, se entregarán a cada Comuna un listado indicando la asignación de la ayuda para cada localidad que deriva de los informes Alfa y Delta que han sido validados por el gobierno Regional o Provincial, las

estaciones de acopio intermedias y los caminos habilitados por los cuales los camiones de determinada capacidad deben transportarla.

III. SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA EN LA ONEMI

El desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (S.I.G.) al interior de la ONEMI, se ha enmarcado principalmente en el objetivo de entregar un soporte al proceso de torma de decisiones, a la vez de realizar modelos y simulaciones frente a fenómenos de riesgo que apoyen la prevención y la mitigación de éstos.

Los S.I.G. son una herramienta sistemática para referir geográficamente una serie de "capas" de información, a fin de facilitar la superposición, cuantificación y síntesis de los datos, permitiendo de esta manera mejorar el proceso de toma de decisiones. Sin lugar a dudas, uno de los ámbitos donde se ha aplicado exitosamente esta herramienta es en el manejo de riesgos naturales en el contexto de la planificación del desarrollo integrado, situación que se encuentra ampliamente relacionada con el ámbito de desarrollo de esa oficina.

Es importante destacar que todo el desarrollo informático de esta área se ha basado en plataforma PC, para asegurar una fácil portabilidad de las aplicaciones hacia diferentes sistemas tanto administrativos regionales o comunales, como comunidades científicas.

Los Sistemas de Información Geográfica poseen como característica esencial el manejar datos espaciales y alfanuméricos en forma relacional, permitiendo de esta manera un procesamiento rápido y eficiente de la información territorial.

Convencidos de ésto, es que se planteó como principio básico del funcionamiento del laboratorio el prestar un servicio a los profesionales que laboran en el tema de la Protección Civil al interior y exterior de esa Institución, entregando el acceso a una herramienta computacional de punta que facilite el proceso de toma de decisiones.

Bajo este concepto, se planteó el funcionamiento del Laboratorio de S.I.G. al interior de la Unidad de Telecomunicacionas e Informática, con el propósito

fundamental de potenciar el rol coordinador de la ONEMI en todas las etapas del ciclo de gestión de riesgos.

3.1 Funciones del Laboratorio de S.I.G.

a.- Generar una Metodología para el desarrollo de proyectos con el uso de S. I. G. en desastres,

b.- Generar cartografía y aplicaciones en las escalas definidas para cada efecto, para dar cumplimiento a los objetivos propuestos en los diferentes proyectos.

c.- Diseñar, estructurar y actualizar las bases de datos espaciales las que formarán parte del Banco de datos de ONEMI.

d.- Regular la producción de cartografía, indicando el formato de salida Institucional.

e.- Entregar el soporte técnico.

f.- Regular el almacenamiento de la información espacial, bajo las medidas definidas por la Unidad de Telecomunicaciones e Informática, que persigue llegar a un sistema ordenado y relacionado para conformar el Banco de Datos de ONEMI.

3.2 Definición de parámetros

Existen diversas formas de procesar los datos dependiendo de cual sea la escala de recolección de estos, apreciándose tres niveles, Regional, Comunal y Local. Los niveles de información antes mencionados delimitan las áreas de aplicación en tres categorías que permiten hacer el ingreso de información a escalas específicas según los objetivos y parámetros de información definidos.

a) Nivel Nacional

Mapas de Macrozonificación

Esc. 1: 1.000.000 - 1:500.000

Permiten conocer las amenazas en forma global que orienten la identificación de zonas homogéneas que, por su impacto, requieren de estudios adicionales.

b) Nivel Regional

Mapas de Riesgos Mayores

Esc. 1:250.000 - 1:50.000

Permiten la evaluación de amenazas, lo que combinado con la información de recursos, población e infraestructura determinan el riesgo e identifican elementos críticos. Esta información permite diseñar estrategias de mitigación y actividades de desarrollo que limiten la vulnerabilidad.

c) Nivel Local

Mapas de Microzonificación

Esc. 1: 25.000 - 1:5.000

Permiten generar medidas específicas de mitigación, para la localización de proyectos de inversión. Facilita los estudios de factibilidad de proyectos sectoriales y permite generar planes de aplicación.

3.3 Aplicabilidad de los S.I.G. en ONEMI

Los objetivos generales de aplicaciones de S.I.G. se orientan a apoyar el proceso de toma de decisiones, entregando una herramienta que agilice el tratamiento y análisis de los datos en las diferentes fases del ciclo de gestión de riesgo. Estos objetivos son:

a) Posibilitar el acceso a información multivariada a los usuarios de las áreas de prevención y atención de desastres.

b) Facilitar la visualización gráfica y alfanumérica de las líneas vitales y de infraestructura de interés, para el desarrollo de tareas antes, durante y después del desastre, así como para consultar sobre recursos estratégicos que permitan respaldar la torna de decisiones de los diferentes grupos de trabajo en casos de respuesta.

c) Entregar flexibilidad para el seguimiento ordenado y sistemático de la evolución de desastres evitando la pérdida y descentralización de información vital.

d) Proveer soporte para la evaluación preliminar ante posibles situaciones de desastre, haciendo uso de la zonificación de amenazas del país.

e) Establecer escenarios para el desarrollo de acciones de prevención y atención.

f) Identificar y evaluar medidas tendientes a apoyar la planificación territorial y la respuesta en casos de desastres.

3.3.1 Areas de desarrollo

Específicamente en el ámbito Informático, la ONEMI ha impulsado un plan de desarrollo donde uno de los elementos importantes que se consideran es la

aplicación de Sistemas de Información Geográfica. Este enfoque contempla el apoyo en tres áreas específicas del desarrollo de ONEMI:

a) *Planificación:* en este ámbito se pueden distinguir aplicaciones donde por superposición de diferentes capas de información se puedan identificar áreas, líneas o puntos que sean relevantes para los objetivos del analista. Como ejemplo evidente se puede mencionar los mapas de riesgo.

b) Operación: en este ámbito se pueden distinguir aplicaciones donde un operador consulta información directamente sobre la cartografía de una zona, lo que le permite observar desde su punto de trabajo bases de datos relacionadas a la posición de una entidad.

c) Cartografía Digital: esta aplicación es la más evidente de las mencionadas ya que contempla la producción de cartografía temática, esta aplicación además es complementaria de las anteriores.

Dado estos ámbitos, se definieron tres principales líneas de acción:

a) Aspectos Preventivos y de mitigación: estos consideran la definición de metodologías para la generación de mapas de amenaza, vulnerabilidad y recursos. Se contempla como aspecto fundamental el lograr una verdadera participación de las organizaciones locales en este proceso, de forma tal que permita que estas organizaciones puedan confeccionar bajo un criterio, su propia cartografía de riesgo.

b) Aspectos Operativos: estos consideran el desarrollo de una serie de aplicaciones en el área de base de datos y análisis espacial, las que permitirán apoyar el proceso de toma de decisiones que implica el manejo de los datos en la fase de respuesta a los efectos de un desastre. En este contexto entra la presente memoria, que pretende desarrollar un modelo de toma decisiones óptimas para el transporte y localización de bodegas.

c) Aspectos de Investigación y Definición de Estándares: si bien en cada una de las áreas anteriormente definidas existen elementos de investigación y de definición de estándares, en forma específica ha existido una preocupación por definir

elementos de este tipo que aseguren la portabilidad de las aplicaciones desarrolladas, en forma acorde con el desarrollo de la planificación para emergencia existente y el propio desarrollo de las organizaciones locales.

En el anexo A se describen experiencias de uso de las herramientas de SIG en la ONEMI.

IV. APLICACIONES Y USO DEL PROGRAMA SIG ARCVIEW

4.1 Aplicaciones

Un sistema de información geográfico (SIG) es una herramienta de computación para dibujar y analizar los objetos que existen y los eventos que suceden en la tierra. La tecnología SIG integra las funcionalidad de las bases de datos comunes, como almacenamiento y análisis estadístico, con la visualización y los beneficios únicos del análisis geográfico ofrecido por los mapas. Estas habilidades distinguen a los SIG de otros sistemas de información y los hacen valiosos en una amplia gama de usos en los sectores público y privado, para explicar eventos, predecir resultados, y planear estrategias.

Un grupo importante de los mayores desafíos que enfrentamos en el mundo de hoy: la superpoblación, polución, deforestación, los desastres naturales, etc., tienen una dimensión geográfica crítica. Otras actividades como la posición de un nuevo negocio, encontrar el mejor suelo para plantar uvas o encontrar la mejor ruta para un vehículo de emergencia también tienen un componente geográfico importante.

Los SIG dan el poder para crear mapas, integrar información, visualizar escenarios, resolver problemas complicados, presentar ideas poderosas, y desarrollar soluciones eficaces como nunca antes. La cartografía y el análisis geográfico no son nuevos, pero un SIG realiza estas tareas bien y más rápidamente que los métodos manuales. Antes de esta tecnología, sólo unas pocas personas tenían las habilidades necesarias para usar información geográfica, ahora se abre un gran espacio para personas de distintas especialidades, permitiendo su utilización para tomar decisiones y resolver problemas.

Un GIS almacena información sobre el mundo como una colección de capas temáticas que pueden ser unidas geográficamente. Este simple, pero extremadamente poderoso y versátil concepto, ha probado ser muy útil para resolver

problemas de la vida real, desde el ruteo de vehículos hasta modelos globales de circulación atmosférica.

4.2 Uso del ArcView

Los mapas en ArcView son basados en información espacial. La información espacial consiste en datos que contienen ubicación geográfica sobre objetos o elementos sobre la Tierra, junto con atributos con información que describen estos objetos.

Estos objetos son de tipo vectorial y se clasifican en tres grupos básicos:

a) Puntos (**points**)

b) Líneas (**lines**)

c) Polígonos (**polygons**)

Una colección de puntos, líneas y polígonos que se refieren a un concepto común se denomina tema (**theme**), que representa el grupo básico de cualquier mapa. A cada objeto del tema, se le asocia características que definen sus atributos, generando así la información que define y explica a éstos. Los datos son almacenados en una base de datos que describe los objetos y como veremos más adelante, podrán ser vinculados con otras bases de datos.

De esta forma, una superposición de temas con distinto significado construye lo que denominamos un mapa o proyecto (**project**). Estos temas están correlacionados topológicamente, por lo cual, su superposición permite agregar datos en forma lógica permitiendo su manipulación y análisis.

Existe un gran número de fuentes de información geográfica. Estas van desde organizaciones gubernamentales hasta empresas cuyo giro específico es la producción de información cartográfica. Esta información se puede complementar o

editar para alcanzar los requerimientos específicos de cada proyecto. Para el desarrollo presente, es necesario definir objetos que representen conceptos especiales a los cuales se les otorgará atributos y características geográficas, para así manipular la información y desplegar el resultado del análisis.

Se comenzará con la creación de un tema de puntos, para luego crear uno de líneas.

Temas de Puntos:

Estos objetos deben crearse si solo se desea representar la posición central de un objeto o si para el rango de escala para el cual se utilizará la aplicación, los objetos resultan ser muy pequeños. En estas figuras pueden ser representados pozos, tiendas, ciudades, postes, etc.

Se debe partir creando una nueva vista (*view*, si es que no hay una abierta o no la necesitamos), esto se efectúa con *view -> new view*.

Del menu *view* elegir *New Theme*, esto hará aparecer un cuadro de diálogo del cual podremos elegir el tipo de objeto: *Feature Type -> Point.*

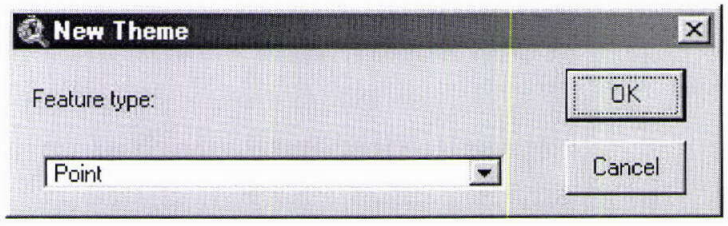


Figura 4.1 Nuevo Tema

Especificar el nombre y la ubicación del archivo en el cuadro de diálogo siguiente. Este archivo tendrá una extensión *.shp* de *shapefile format*, en este formato se guardará el tema con toda la información topológica y datos referentes a él.

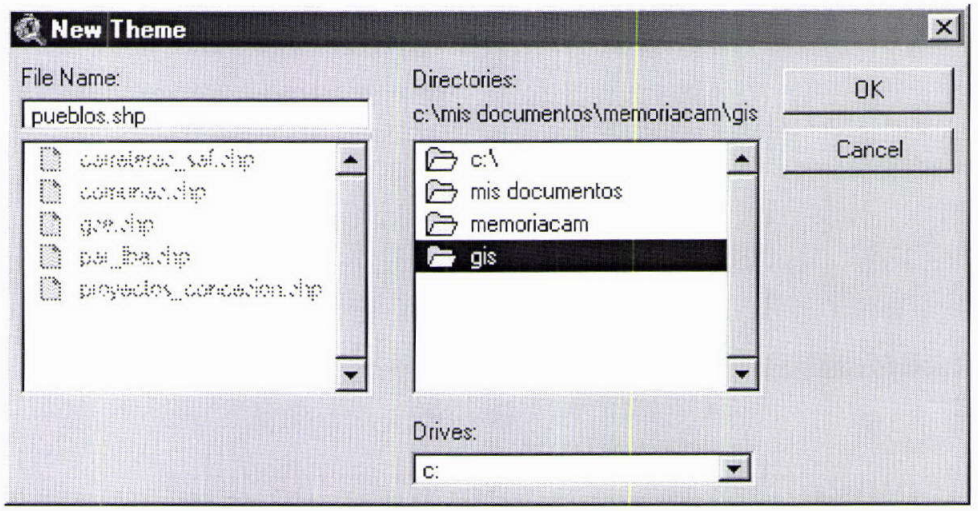


Figura 4.2: Menu de archivos para nuevo tema.

Luego seleccionar de la barra de dibujo el símbolo de punto. Agregar los puntos haciendo click izquierdo con el mouse.

Cuando se haya terminado el proceso, elegir *Stop Editing* del menú *Theme.*

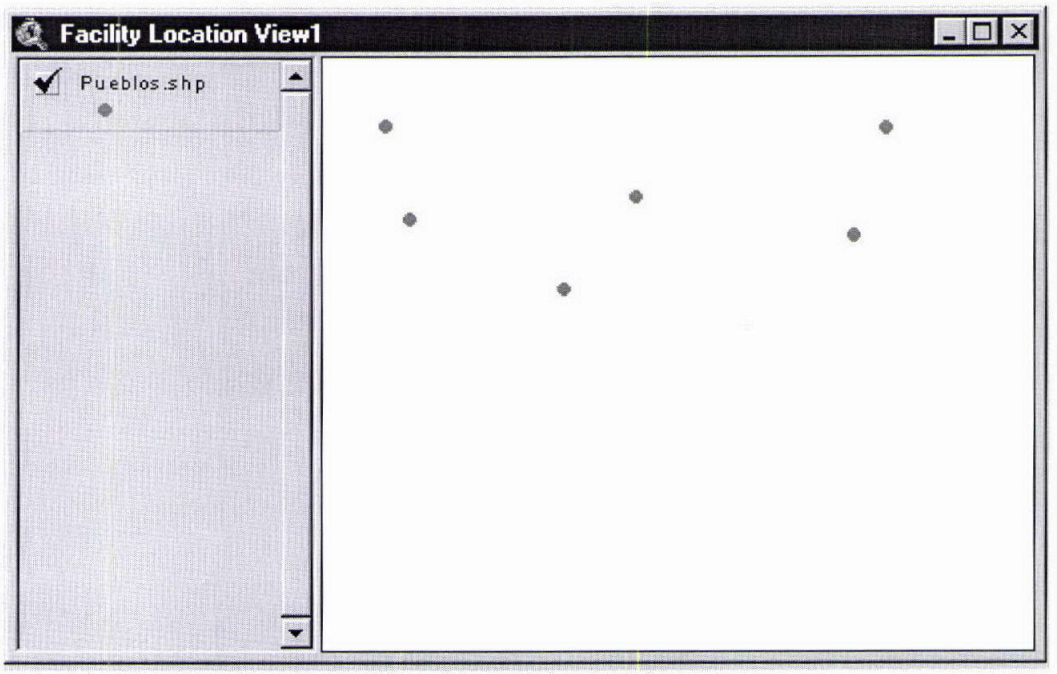


Figura 4.3: Elementos Point.

Es importante destacar que al crear elementos, estos quedarán georeferenciados con respecto a otros temas que estén abiertos en ese momento. Esta es una buena práctica dado que permite utilizar otros temas como referencia y así determinar la posición y el tipo de proyección utilizada para los objetos. En el caso que no existan temas activos contra los cuales referenciar los nuevos elementos, se debe tener el cuidado de definir el tipo de proyección, escala y posición de los objetos creados.

Atributos de los Objetos

Ahora se deberá agregar datos a los elementos que se han creado (atributos) que serán los que describirán y definirán los nuevos objetos. Cuando se crea un tema, el programa crea una tabla de atributos (*attribute data*), que inicialmente, sólo contiene una campo llamado *shape.* Este describe el tipo de elemento (*point, line o polygon*) y no puede ser editado dado que es un parámetro interno. Adicionalmente, se le pueden definir más campos, que serán en los cuales se

ingresarán los atributos del objeto, ordenados en forma tabular. Esto se realiza de la siguiente forma:Del menú *theme* elegir *Star Editing*,

Abrir la tabla del tema, seleccionándola del menú *Table* o con el *ícono Open Theme Table* en la barra de herramientas.

Del menú editar, elija *Add Field* (agregar campo). Aparecerá un cuadro de diálogo en el cual se deberá ingresar el nombre del campo, el tipo (*string, number, etc*) y el largo.

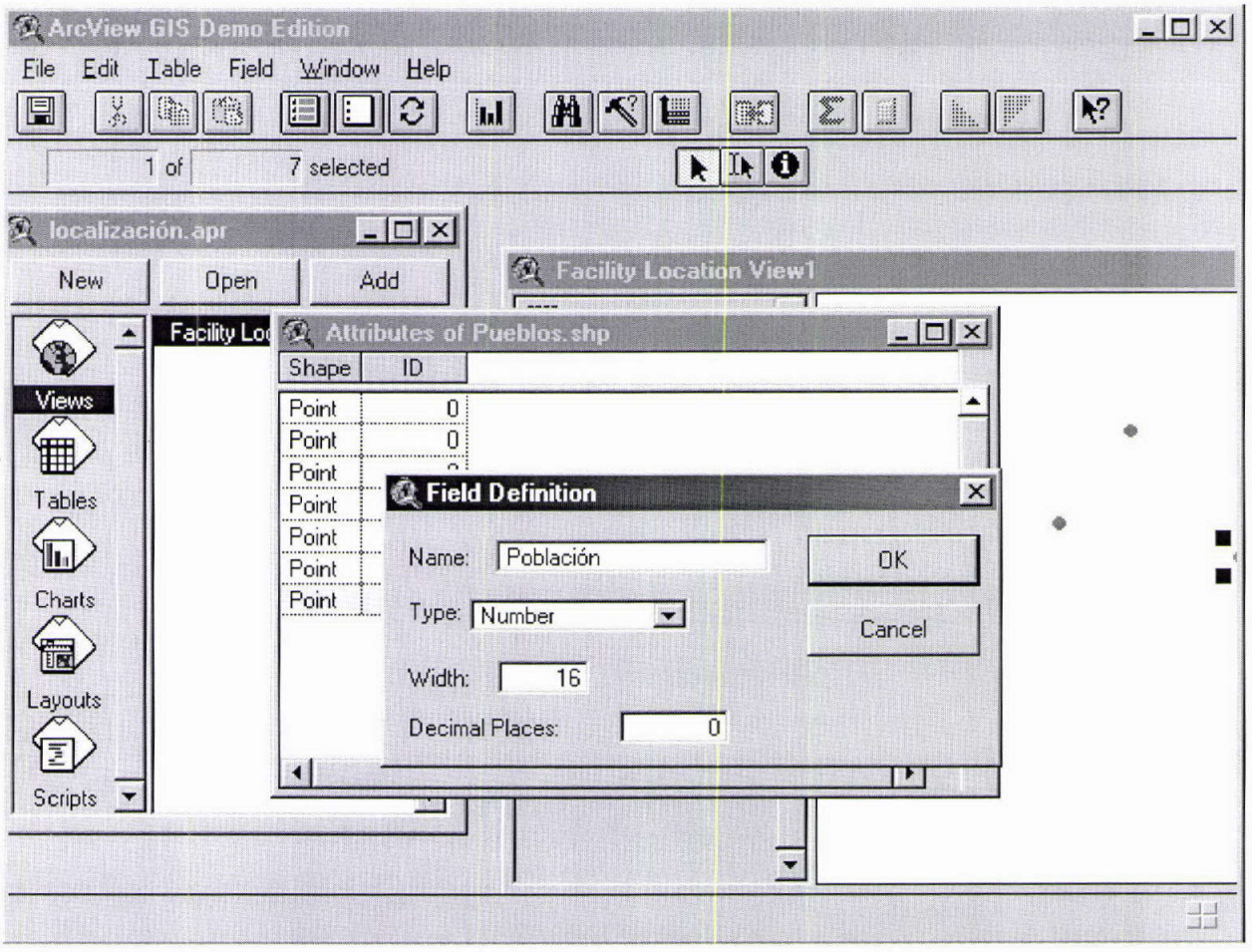


Figura 4.4: Creación de nuevo campo.

Al aceptar se mostrará la tabla con el nuevo campo creado.

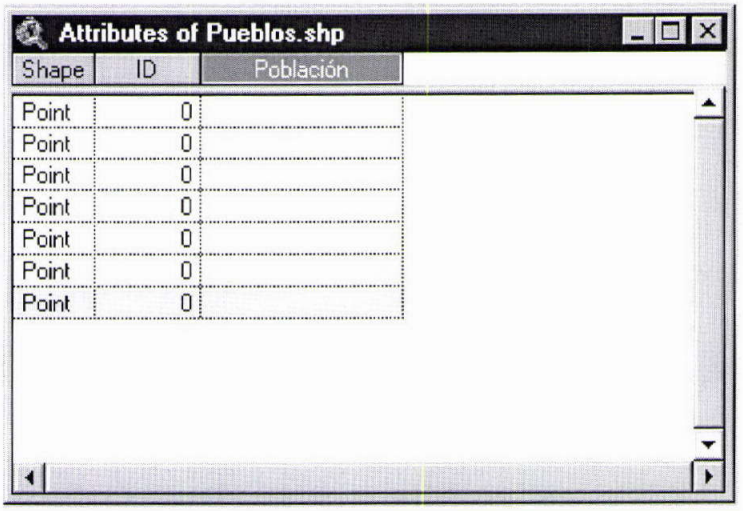


Figura 4.5: Tabla de nuevo campo.

Ahora se puede agregar datos a este campo para cada punto. Para esto se debe activar la herramienta de selección en la vista y seleccionar el punto. Luego activar la tabla, se notará que el registro correspondiente al punto seleccionado, estará destacado. En este momento se puede ingresar el valor del atributo.

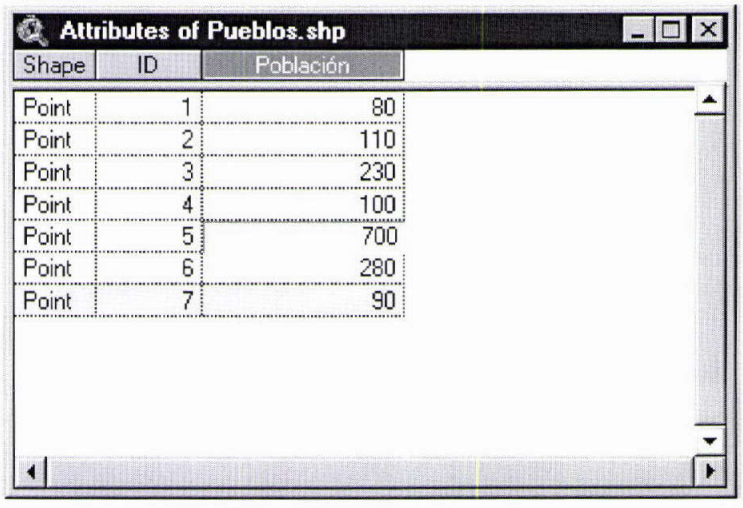


Figura 4.6: Edición de datos en nuevo campo.

Una vez creado el tema, este puede ser mantenido, por ejemplo, se pueden eliminar objetos que ya no deben estar o mover algunos ya existentes. Para esto sólo se debe seleccionar el o los puntos y moverlos con el mouse, la información topológica de estos será automáticamente actualizada.

Temas de Líneas:

Si los datos consisten en elementos muy delgados para ser representados como áreas, entonces se debe usar líneas, como por ejemplo calles, ríos, tuberías, etc. Para crear un tema de líneas el procedimiento es análogo a lo descrito anteriormente para puntos. Sin embargo existen un par de conceptos adicionales que se deben tener en cuenta en su creación.

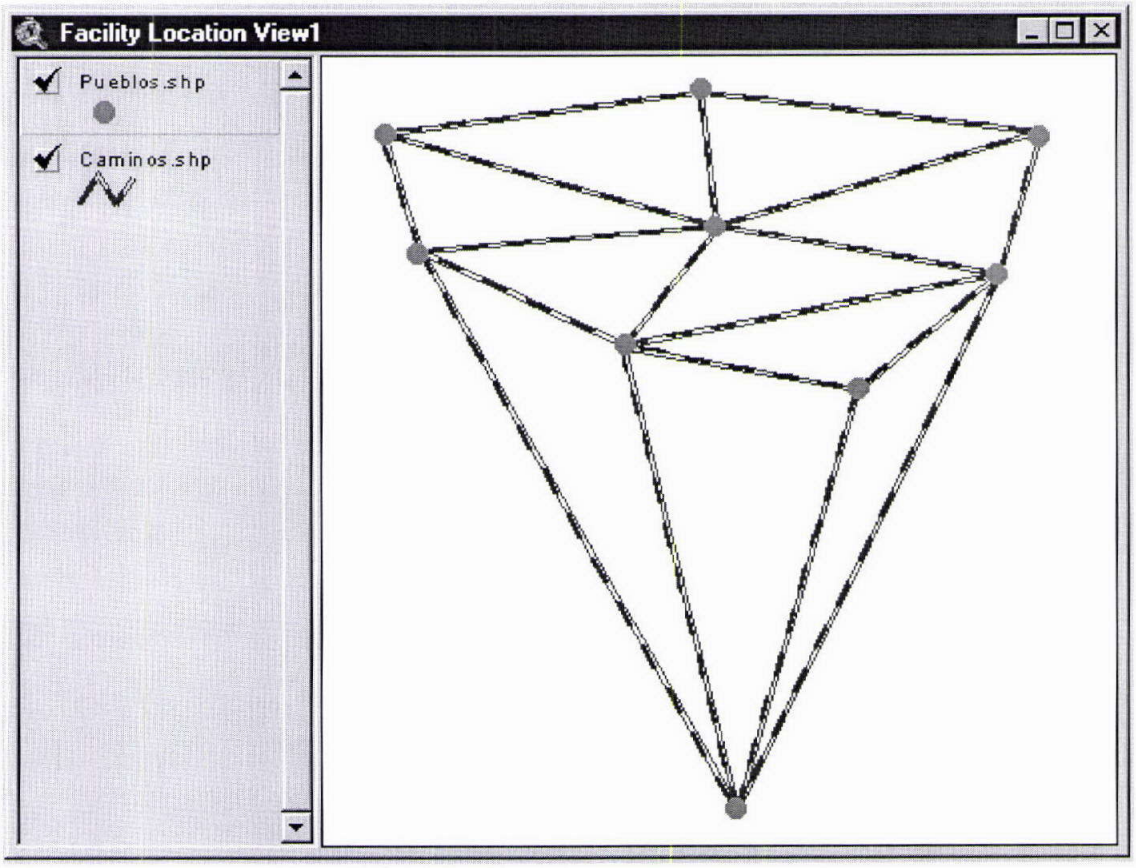


Figura 4.7: Tema de Líneas.

Tolerancia:

Esta consiste en el ambiente de ajuste (*snapping environment*), este concepto se refiere a la convergencia de las líneas y ajuste de estas. Así se definen criterios para que líneas con un final muy próximo tengan, en efecto, un final común (calles, líneas eléctricas). O que una línea que termina muy cerca de otra, termine en esta y no quede junto antes o un poco más cruzada (*undershoots o overshoots*). Para esto se define una *tolerancia*, esta unidad indicará la distancia máxima entre dos objetos para la cual no actuará el ajuste. Para cualquier distancia menor, el programa ajustará los objetos de manera de obtener puntos únicos de intersección e integración adecuada de objetos.

Para indicar la tolerancia a cada tema se debe:

Hacer activo el tema a definir seleccionándolo de la vista. Seleccionar el botón de propiedades del tema. En el cuadro de diálogo que aparecerá, seleccionar el ícono *editing*, en el panel de *snapping* seleccionar la caja *general* y luego ingresar la tolerancia deseada en el cuadro *tolerance*.

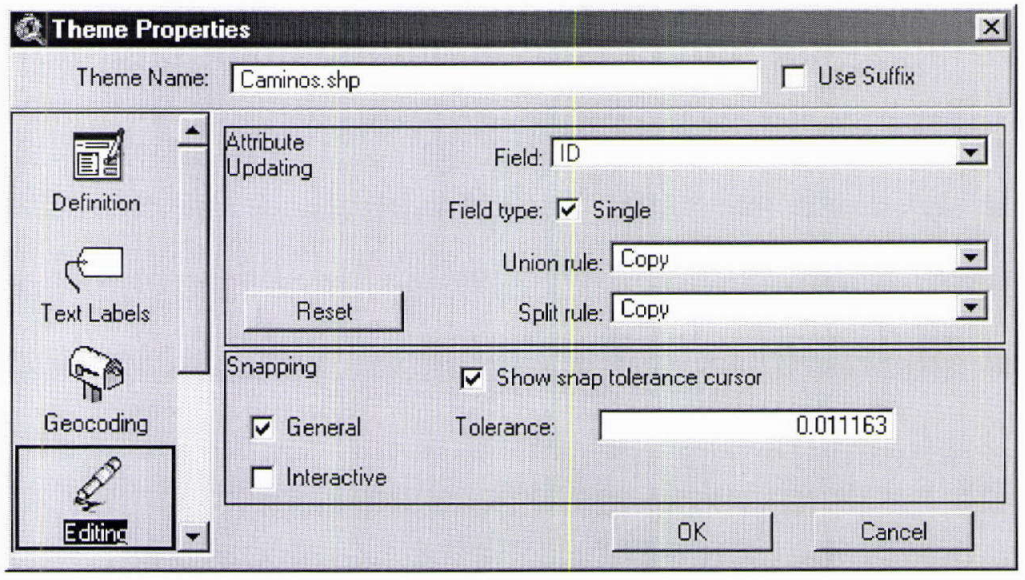


Figura 4.8: Tolerancia.

Divisiones y Uniones de Objetos:

Este concepto se refiere a los cambios de los atributos de una línea al ser dividida (*splitted*) o unida (*merged*) con otra. Se debe establecer que criterio se utilizará para actualizar los campos de atributos de los objetos, las reglas de división son:

Blank: el valor en ambos registros quedará en blanco.

Copy: el valor original será asignado a cada uno de los registros creados.

Proportion: el valor será proporcional al largo de cada segmento.

Shape Length: el valor será el largo de cada nueva línea.

se definen para la unión:

Blank: el valor del nuevo objeto quedará en blanco.

Copy: el valor original del primer registro en la tabla de datos será asignado la nueva línea.

Proportion: el valor será proporcional al largo del nuevo objeto.

Shape Length: el valor será el largo de la nueva línea.

Add: el valor será la suma de los dos valores anteriores.

Average: el valor será el promedio de los dos valores originales.

Para definir estos criterios se debe:

Activar el tema y abrir el cuadro de propiedades (*Theme Properties*)

En el cuadro de diálogo que aparecerá, seleccionar el ícono *editing*, en el panel *Attribute Updating* seleccionar el campo del tema sobre el que se quiere se aplique la regla.

Seleccionar la opción *single field type* (el criterio se aplicará a un campo).

Elija la regla de unión en *Union Rule.*

Elija la regla de separación en *Split Rule.*

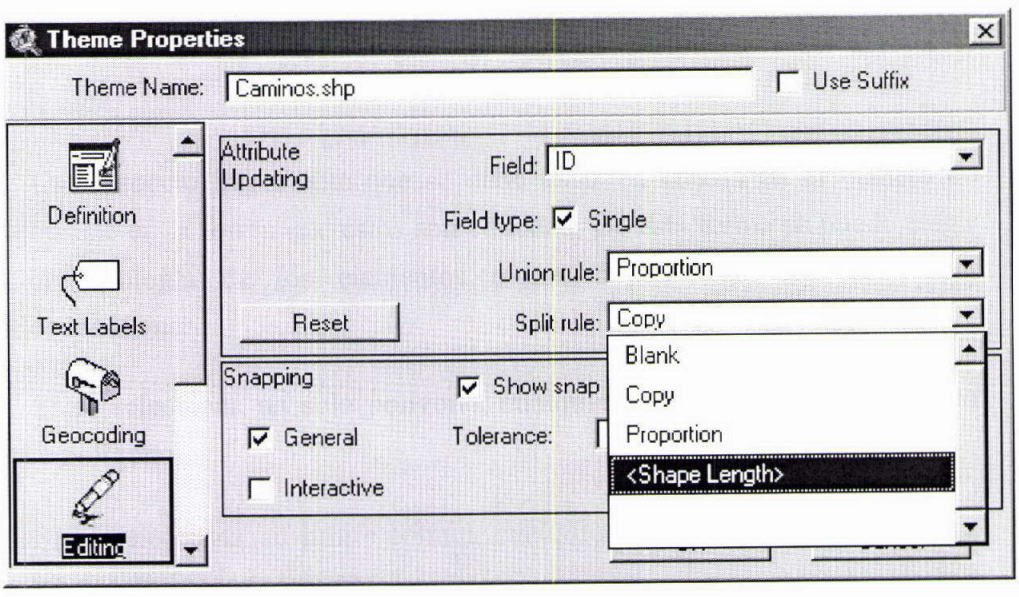


Figura 4.9: Regla de Separación.

Temas de Polígonos:

Si los datos tienen dos dimensiones que se desean definir, como es el caso de áreas de tierra, ciudades, lagunas, etc. entonces es necesario definir polígonos. Estos se crean en forma análoga a lo anteriormente descrito para las líneas. Sin embargo también existe los conceptos de *snap* y los criterios de unión y separación de elementos. Los criterios de *snap* son un poco distintos razón por la cual los describiremos:

Encontrar el directorio que contiene el archivo, seleccionarlo y aceptar.

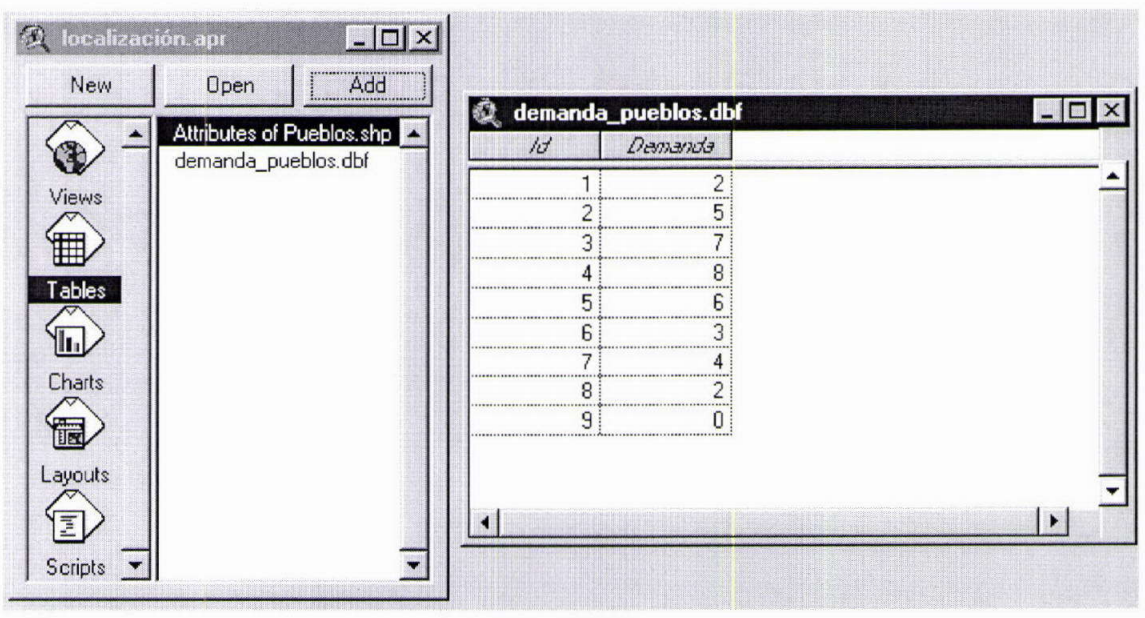


Figura 4.11: Base de datos cargada.

Un concepto importante con respecto a la carga de una base de datos al proyecto, es que ésta no es guardada directamente, sino que se registra un vínculo entre la tabla de la aplicación y la base de datos original. Esto permite mantener actualizado en todo momento los datos de la tabla, así cualquier cambio efectuado en el origen de la información se verá reflejada en el proyecto. Esta actualización se realiza cada vez que el proyecto es abierto y además puede ser forzada con el comando *Refresh* del menú *Table.*

Vincular Tablas:

Una vez que tenemos la dase de datos importada, es necesario vincularla (*join*) con la tabla de datos del tema al cual se le quiere agregar los datos. Cuando se efectúa esta unión, todos los campos de la fuente agregada se integran a la tabla original del tema, permitiendo así efectuar cualquier análisis de estos datos.

Una unión está basada en los valores de un campo común de ambas tablas. El nombre de estos campos no precisa ser el mismo, sin embargo, debe existir datos coincidentes y que estén en campos del mismo tipo (string, number, boolean, etc.)

Para realizar esta operación se debe:

Seleccionar y abrir la tabla importada del ícono *Tables*.

Seleccionar el campo con respecto al cual se hará la unión.

En el cuadro de vista, seleccionar el tema al cual se le agregarán los datos.

Abrir la tabla de datos de ese tema presionando el ícono *Open Theme Table*

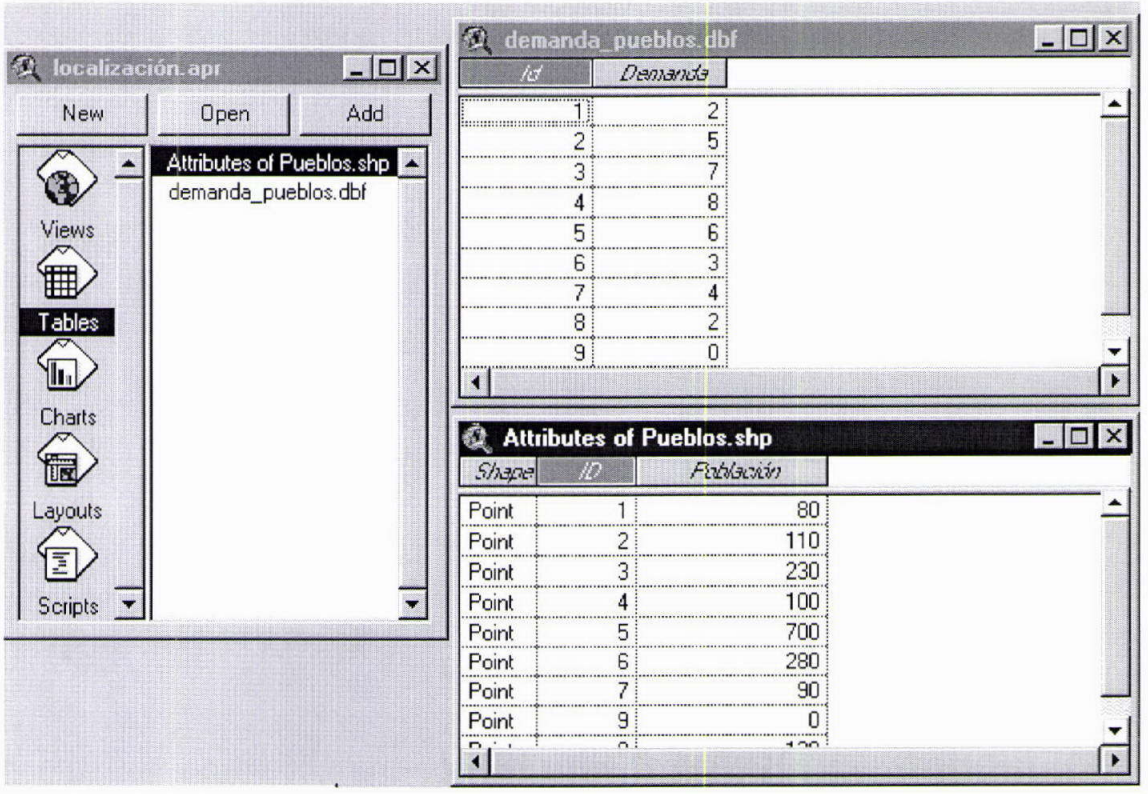


Figura 4.12: Bases de datos a unir.

Apretar el botón *join* del menú de herramientas. En este momento todos los campos de la tabla externa se agregarán a la tabla del tema y se cerrará la base antigua.

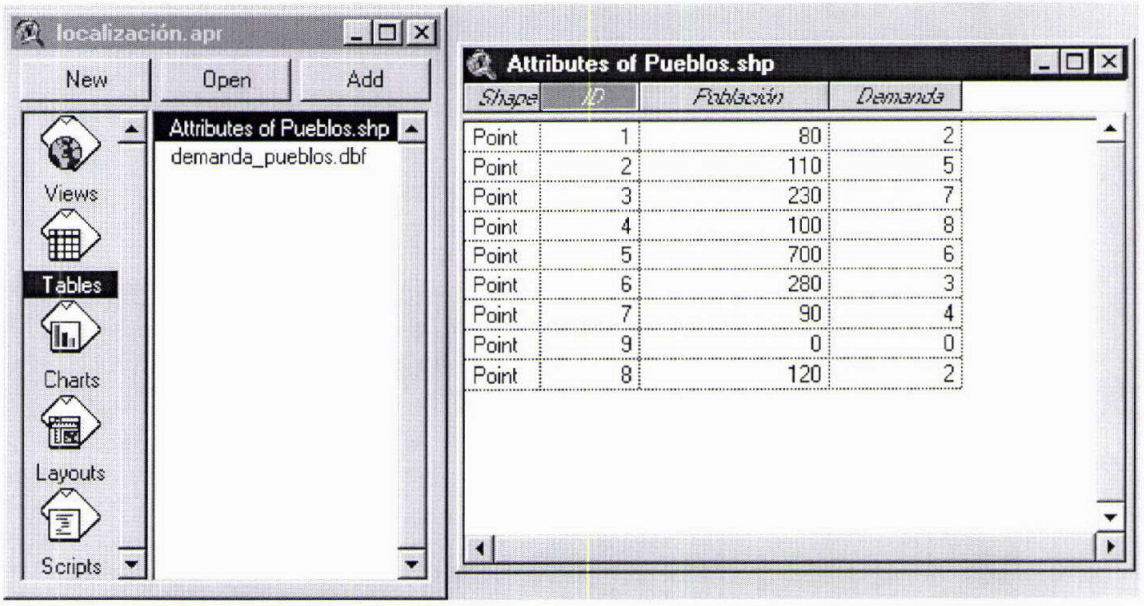


Figura 4.13: Bases de datos unida.

Tipos de Relaciones:

Al efectuar relaciones entre tablas, estas pueden ser del tipo uno a uno (*one to one*) o varios a uno (*many to one*). En las relaciones del primer tipo, se establece una correspondencia única entre elementos de ambas tablas. Este es el caso por ejemplo de ciudades con sus respectivas poblaciones. El otro caso, varios a uno, se refiere cuando a cada valor de la tabla original (que pueden estar repetidos), es asignado un valor único en la tabla agregada. Este sería el caso de ciudades versus el tipo de clima, donde el clima se puede repetir en varias ciudades y al unírseles una tabla de definición de climas, cada ciudad quedaría con su definición apropiada.

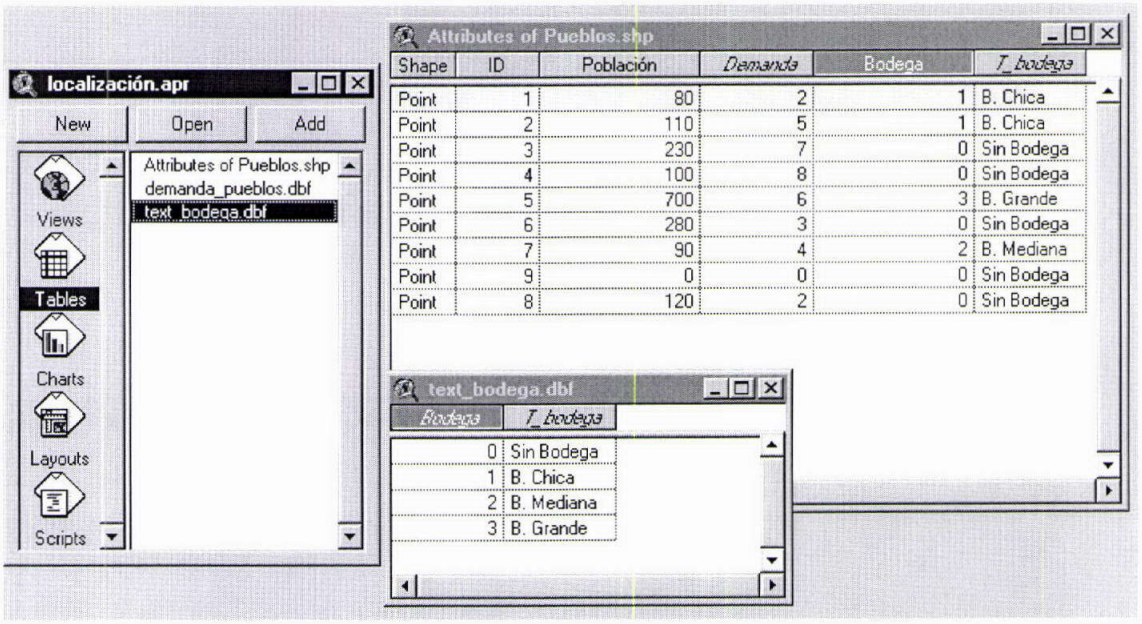


Figura 4.14: Tipos de Relaciones.

4.3 Almacenamiento de vínculos

Los vínculos son almacenados según su definición y no la tabla que fue generada producto de esto. Así cada vez que se abre el proyecto correspondiente, el vínculo es reconstruido, incorporando de esta manera cualquier cambio producido en la fuente, reactualizando y ajustando los valores y datos adquiridos.

De manera análoga, los datos provenientes de las tablas vinculados no pueden ser modificadas, debido a que son el reflejo de otra fuente original. Para efectuar esto se tiene que cambiar la fuente original mediante su aplicación madre, para luego reflejar estos cambios en la unión.

4.4 Desplegar resultados o Mapas Temáticos

En las secciones anteriores, se ha revisado como construir, modificar y adquirir datos geográficos de manera de reflejar la realidad que queremos analizar. Veremos entonces como mostrar la información de manera de poder procesar, distinguir y comunicar en forma clara soluciones a problemas, incorporando la dimensión única que permiten los GIS al agregar la variable topológica.

La forma en que se muestran y escogen los diferentes tipos de despliegue de información es utilizando el editor de leyendas (*legend editor*). Esta herramienta nos permitirá:

Elegir la clasificación de un tema entre uno o varios símbolos.

El atributo sobre el cual se clasificarán los temas.

El método de clasificación

El esquema de color de la clasificación.

El símbolo utilizado para cada clase de elementos.

Como serán denominadas cada clase de elementos.

Para realizar esta operación se debe:

Abrir el editor de leyendas, seleccionando el tema y luego haciendo doble click en él o presionando el icono del editor de leyendas en la barra de herramientas.

Aparecerá un cuadro de diálogo, que es el principal desde el cual se efectuarán todos los cambios.

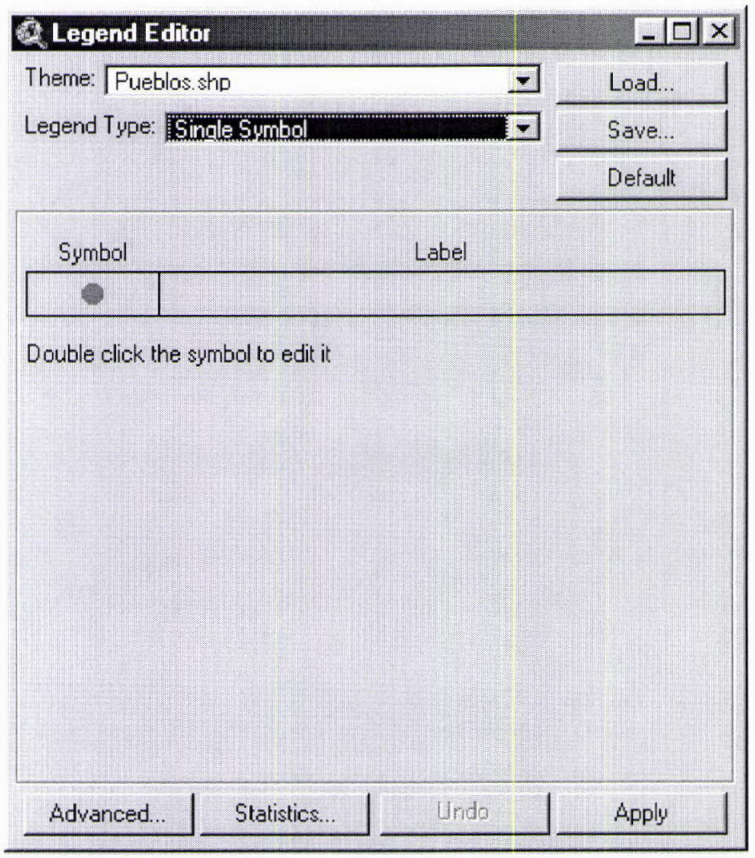


Figura 4.15: Tipos de leyendas.

En *Legend Type* aparecerá la opción entre elegir un símbolo único (*Single Symbol*) o efectivamente elegir algún tipo de clasificación. Estos son: Valor Unico (*Unique Value*), Graduación de Color (Graduated Color), Graduación de Símbolo (*Graduated Symbol*), Puntos (*Dot*) y Gráficos (*Chart*).

El campo de etiqueta o nombre (*label*), permite dar identificación a cada tipo de símbolo creado.

Mapas de Valor Unico:

Estos mapas se deben utilizar en dos ocasiones: 1º Cuando los atributos describen nombres, tipos, condición o categoría de los elementos y 2º Si los elementos contienen atributos que ya están clasificados en grupos.

Para esto elegir *unique value* en el cuadro de tipo de leyenda.

Elegir el campo sobre el cual se clasificará (*classification field).*

Luego elegir los símbolos deseados para cada valor. Describir cada nombre de los símbolos en el campo *label.*

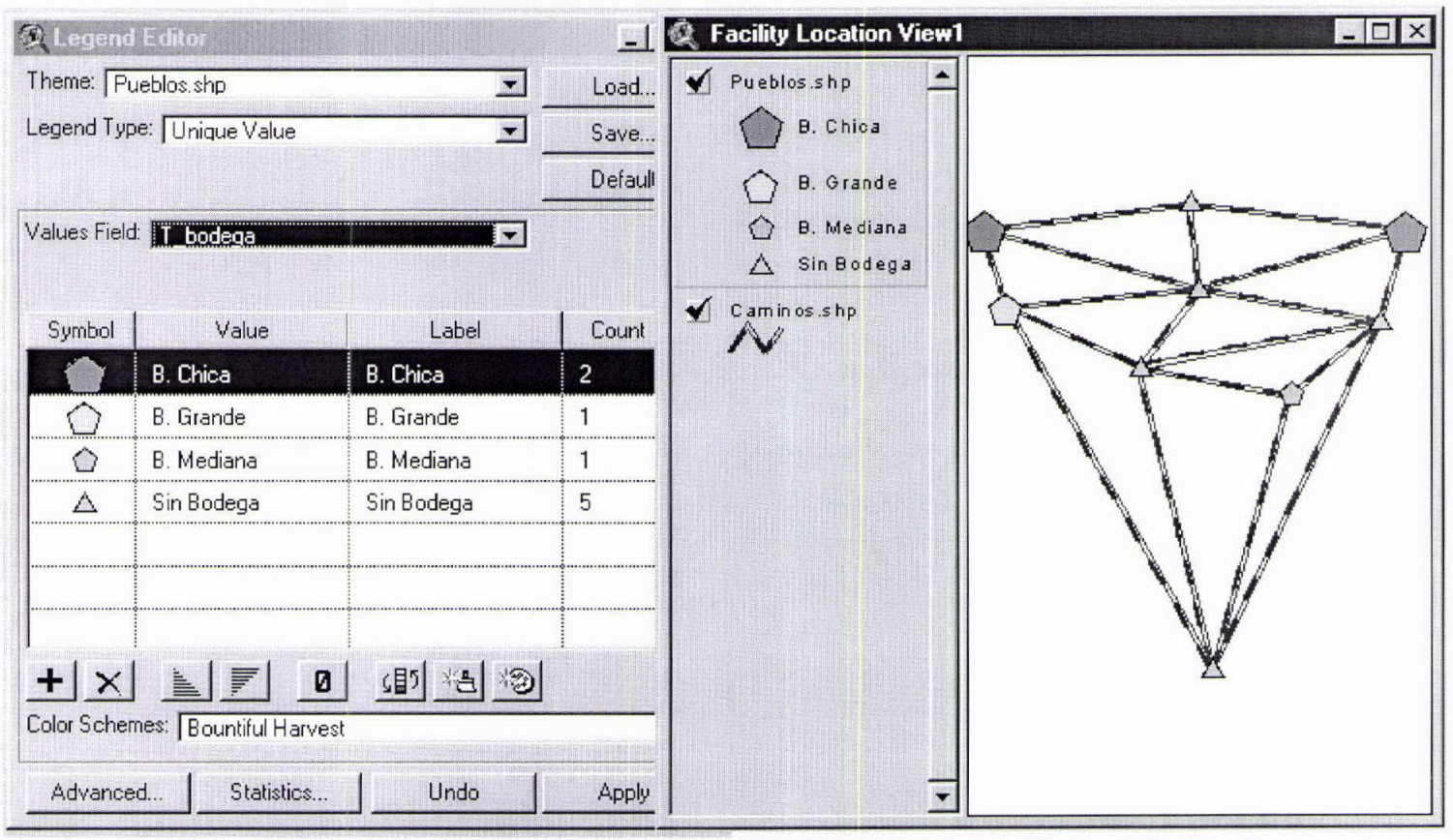


Figura 4.16: Mapa temático de valor único.

Mapas de Graduación de Color:

Estos mapas se deben utilizar cuando se desee crear una simbología por intervalos de una característica (campo), graduando el color en la medida que el valor del intervalo crece o decrece. Un buen ejemplo de esta simbología son los mapas de temperaturas que agrupan las mediciones en rangos y las despliegan según un color.

Para esto elegir *graduated color* en el cuadro de tipo de leyenda.

Elegir el campo sobre el cual se clasificará.

Seleccionar el tipo de normalización (*normalize by*): Esto permite dividir los valores por otro número de manera que la lectura de los resultados se transforma en divisiones o razones. Existen dos maneras de normalizar: La primera consiste en dividir todos los números por la suma total de éstos. De esta manera se consigue una proporción porcentual de los datos los cuales al ser desplegados permiten una mejor lectura de los valores. La segunda manera es dividir el atributo que se quiere graficar por otro atributo de la misma tabla. Con esto se logra reflejar magnitudes en proporción al atributo auxiliar. Una utilidad de esto es por ejemplo si tuviéramos que mostrar la cantidad de ayuda por habitante de cada pueblo. Así dividiríamos las toneladas por la población para calcular la carga relativa por habitantes.

Luego elegir los símbolos del cuadro *colours ramps,* donde se presentarán distintos tipos de progresiones de colores para representar la información.

Describir cada nombre de los símbolos en el campo *label.*

Seleccionar el botón *classify* para determinar el modo en que se agruparán los datos para ser clasificados. Para esto existen cinco opciones que son: Quiebres naturales (*Natural breaks)*, consiste en agrupar los valores según un cambio de patrón relevante. Cantidad (*Quantile*), que agrupa los valores según un número constante de elementos. Area igual (*Equal area*), disponible sólo para polígonos, los cuales se agrupan ordenándolos en forma creciente y en conjuntos tales que la sumas de sus áreas sumen lo más parecido posible. Intervalos Iguales (*Equal interval*), Donde se divide los intervalos de manera que los valores de los objetos estén

distribuidos dentro de intervalos de la misma longitud. Desviación estándar (*Standard Deviation*), agrupa los abjetos según su desviación de la media en intervalos de 1, 0.5 o 0.25 desviaciones estándar.

En el cuadro *number of classes* se debe indicar el número de clases que se desean crear en la clasificación dada.

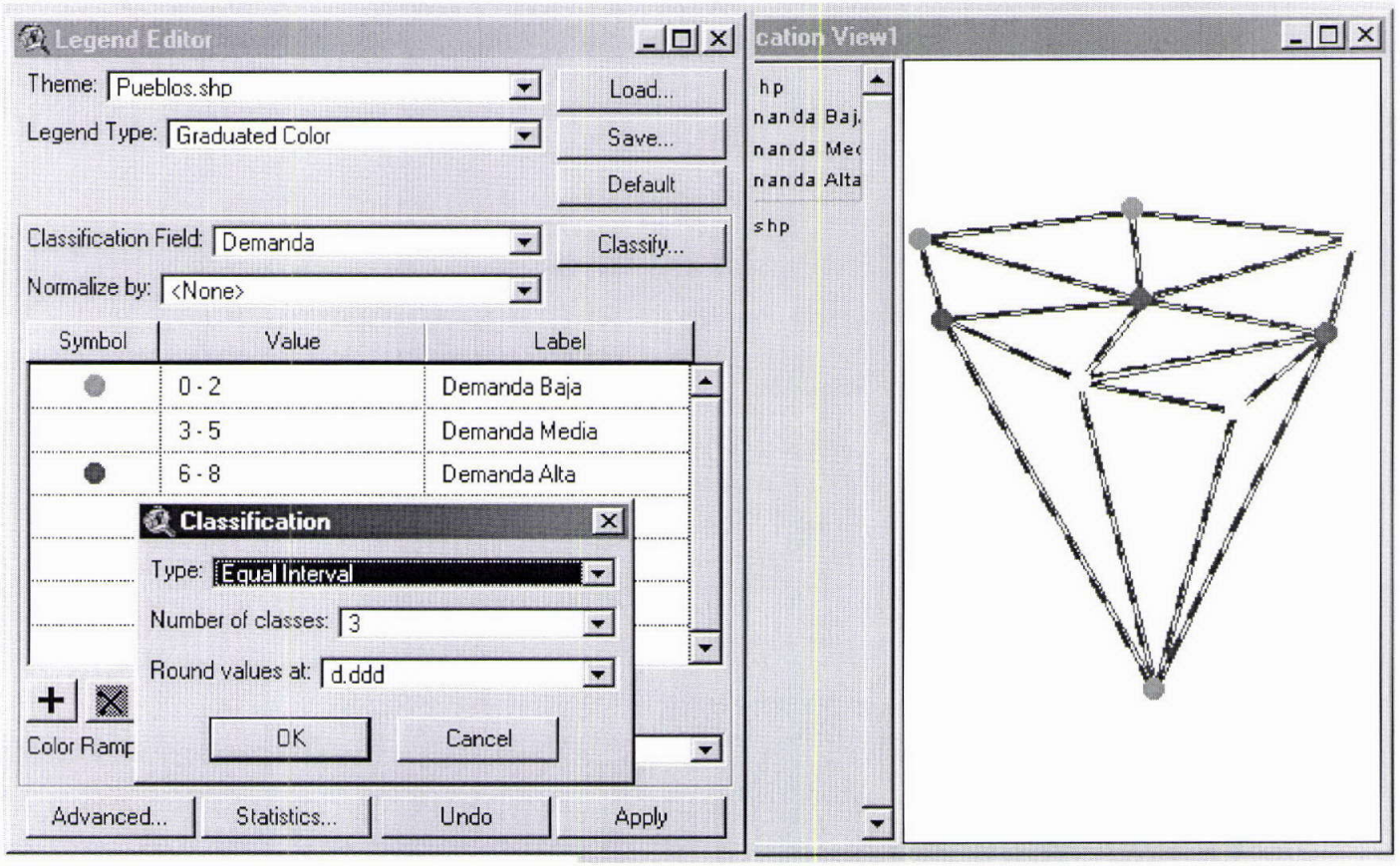


Figura 4.17: Intervalo de clases.

En forma análoga a lo anteriormente explicado se pueden crear los temas basados en Símbolo Graduado (*Graduated symbol*) que consiste en variar el tamaño del símbolo en vez del color, esto es aplicable tanto a puntos como a líneas. Densidad de puntos (*Dot density)*, en el cual una cantidad de puntos dentro de un polígono refleja la magnitud del valor de éste. Gráficos (*Chart)* el cual permite graficar varios atributos por registro creando un gráfico por cada elemento.

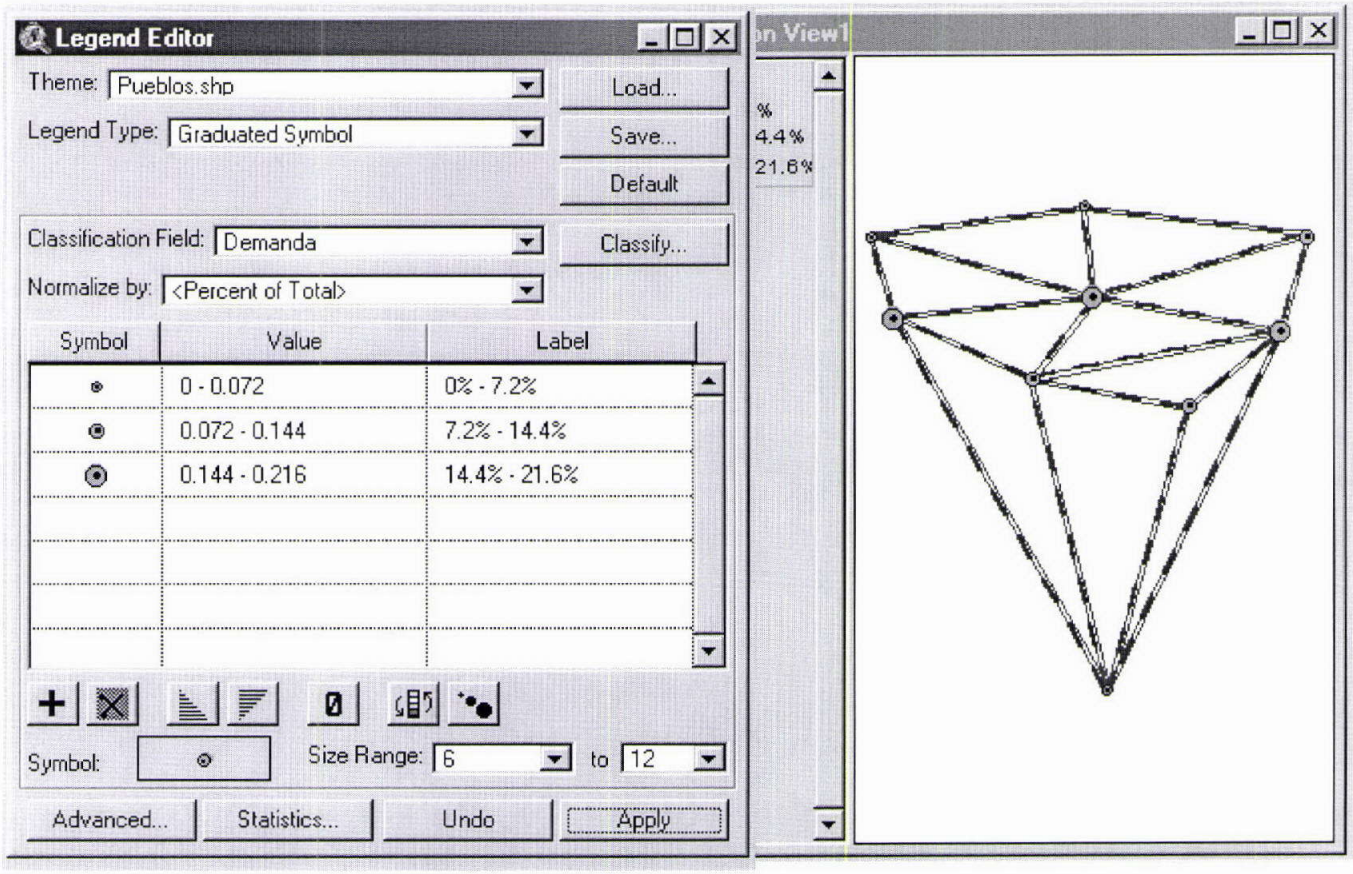


Figura 4.18: Mapa Temático de símbolo graduado.

V. MODELACION DEL PROBLEMA

El problema consiste en encontrar un óptimo de la función de transporte de la carga de ayuda entre lugares poblados, proveniente ésta de un centro común, utilizando o no estaciones de transferencia intermedias, siempre que este costo sea menor que el de transportar directamente la ayuda desde el centro común a cada localidad. Es importante que la aplicación considere tanto la posibilidad de contar con los recursos en forma centralizada como descentralizada, debido a que ciertos acopios pueden no encontrarse disponibles en la región, obligando necesariamente a su envío desde la zona central.

Desarrollaremos el problema utilizando las técnicas que se han construido para la Localización Optima de Recursos. Empezaremos describiendo el modelo de localización de plantas, para luego ir construyendo la solución final según nuestros requerimientos.

Definiremos un sistema básico conformado por nodos y una red que une a estos.

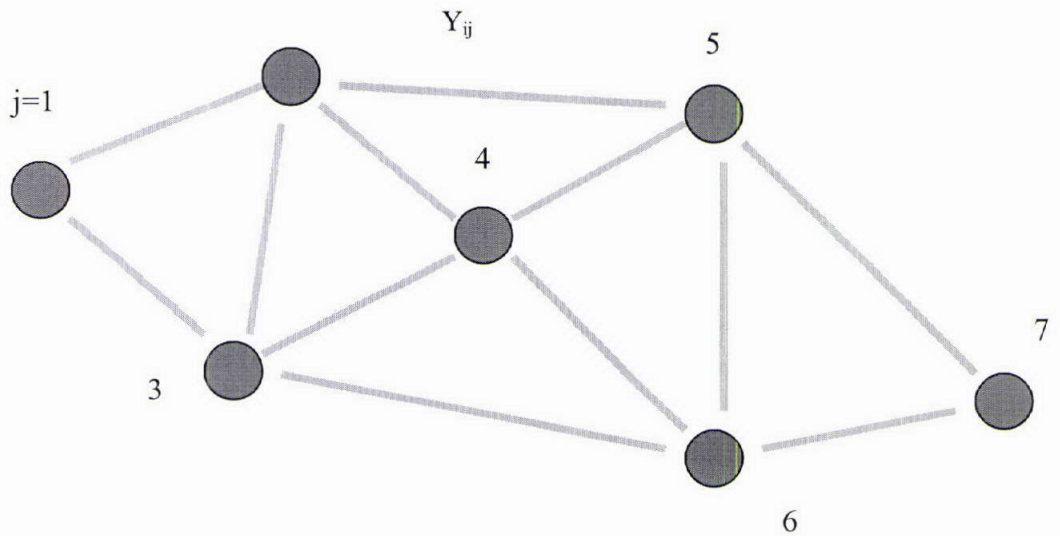


Figura 5.1: Sistema Básico.

El modelo, tendrá que considerar la topología de la red, de esta forma no se definirán las variables que no existan directamente. (como se verá más adelante, Y_{ij} se definirá sólo si existe un camino directo entre i y j) así el modelo es forzado a utilizar sólo la red existente y las relaciones nodo servidor serán solamente *out and back*. La razón de esto obedece a un estándar de disponibilidad de los recursos (ninguna persona tendrá que atravesar más de una localidad para ser atendida), y debido a que los lotes de transporte son mayores que el volumen mínimo de carga, que en este caso sería una camioneta pequeña, por lo cual no se justifica un ruteo de ésta.

También se considerarán los costos fijos de la instalación de un servidor y el costo de transporte por unidad de demanda por unidad de distancia α, de modo de cuantificar el costo total de transporte.

Por la naturaleza del problema, la red cambiará topológicamente, debido a que dado que se consideran rutas terrestres, algunos caminos se inhabilitarán producto del evento destructivo. Esta es una de las potencias de este desarrollo, que permite encontrar una solución rápida a un sistema que ha cambiado y que por lo tanto es diferente a cualquier escenario inicial.

En el caso de la demanda, ésta también será distinta según el desastre ocurrido, esto se debe a que el daño y la consecuente ayuda necesitada será diferente según el tipo, localización y otros factores del evento.

Con estas consideraciones se plantea un modelo de "Localización de Plantas"[1] de la siguiente forma:

sea:

h_i : demanda en el nodo i

d_{ij}: distancia entre el nodo de demanda i y el servidor j

---

[1] En la literatura "Plant Location" o "Fixed Charge Model"

α : costo unitario por unidad de demanda por unidad de distancia

f_j : costo de instalar un servidor en j

Variables de decisión:

$$X_j : \begin{cases} 1 & \text{si se localiza un servidor en j} \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

$$Y_{ij} : \begin{cases} 1 & \text{si la demanda en el nodo i es servida por un servidor en j} \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

(si $j \in N_i$, es decir se define esta variable sólo si Y_{ij} existe en forma directa)

Min:

$$\alpha \sum_i \sum_j h_i d_{ij} Y_{ij} + \sum_j f_j X_j \quad (1)$$

s.a.:

$$\sum_j Y_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (2)$$

$$Y_{ij} - X_j \leq 0 \quad \forall i, j \quad (3)$$

$$X_j = 0,1 \quad \forall j \quad (4)$$

$$Y_{ij} = 0,1 \quad \forall i, j \quad (5)$$

La función objetivo (1) minimiza la suma del costo de transporte de la demanda entre los nodos y los servidores, más el costo fijo de instalar servidores en cada nodo.

La restricción (2) implica que cada nodo sea asignado a exactamente un servidor.

La restricción (3) vincula las variables de distribución con los servidores, de manera que un nodo sea servido sólo si existe el correspondiente servidor.

Las restricciones (4) y (5) obligan a las variables a tomar valores 1 o 0.

Este modelo es capaz de localizar en forma eficiente los servidores (bodegas) de forma tal de minimizar el costo de transporte a los nodos (poblados). Sin embargo, podría suceder que las soluciones dieran un número de bodegas que no sean capaces de almacenar la demanda que tendrá que ser servida.

Por esta razón se hará que el modelo incorpore la capacidad máxima de los servidores, enunciando un modelo capacitado. Este concepto trae la oportunidad de incorporar no solo la capacidad y costo, si no que la opción de poder contar con varios tipos de servidores. Estos tendrán distintas capacidades y en consecuencia distintos costos asociados a éstas. En los problemas prácticos, esta situación es totalmente coherente y se puede, en este caso individual, asociar la factibilidad y costo de adaptar colegios, hospitales, etc. para proveer cierta capacidad.

El modelo incorpora los siguientes cambios:

sea:

f_{jk} : costo de instalar un servidor tipo k en j

Kb_k : capacidad de la bodega tipo k

Min:

$$\alpha \sum_i \sum_j h_i d_{ij} Y_{ij} + \sum_j \sum_k f_{jk} X_{jk} \quad (1)$$

s.a.:

$$Y_{ij} \leq \sum_{k} X_{jk} \quad \forall i, j \quad (2)$$

$$\sum_{i} h_i Y_{ij} \leq \sum_{k} Kb_k X_{jk} \quad \forall j \quad (3)$$

$$\sum_{k} X_{jk} \leq 1 \quad \forall j \quad (4)$$

La función objetivo (1) minimiza la suma del costo de transporte de la demanda entre los nodos y los servidores, más el costo fijo de instalar servidores, según su tipo, en cada nodo.

La restricción (2) vincula las variables de distribución con los servidores, de manera que un nodo sea servido sólo si existe el correspondiente servidor.

La restricción (3) limita la capacidad del servidor a su cantidad máxima de servicio y selecciona el tipo de servidor. Se puede observar que en esta restricción está implícita la (2), por lo tanto de ahora en adelante usaremos sólo la (3).

La restricción (4) estipula que los servidores sólo podrán ser de un tipo a la ves.

Hasta el momento, se ha discutido como optimizar la distribución de carga a partir de los servidores, o centros de distribución. Sin embargo, nada se ha dicho con respecto a como se llega con esta carga a cada servidor.

Es aquí donde se debe hacer una reseña de la topología del problema. Administrativamente, toda la ayuda es centralizada a través de las municipalidades. Esto lleva a definir un centro de distribución principal, que será el ente que gestionará el transporte de los bienes entre los poblados.

Definiremos entonces un nodo principal que lo denominaremos M quedando nuestra red de la siguiente forma:

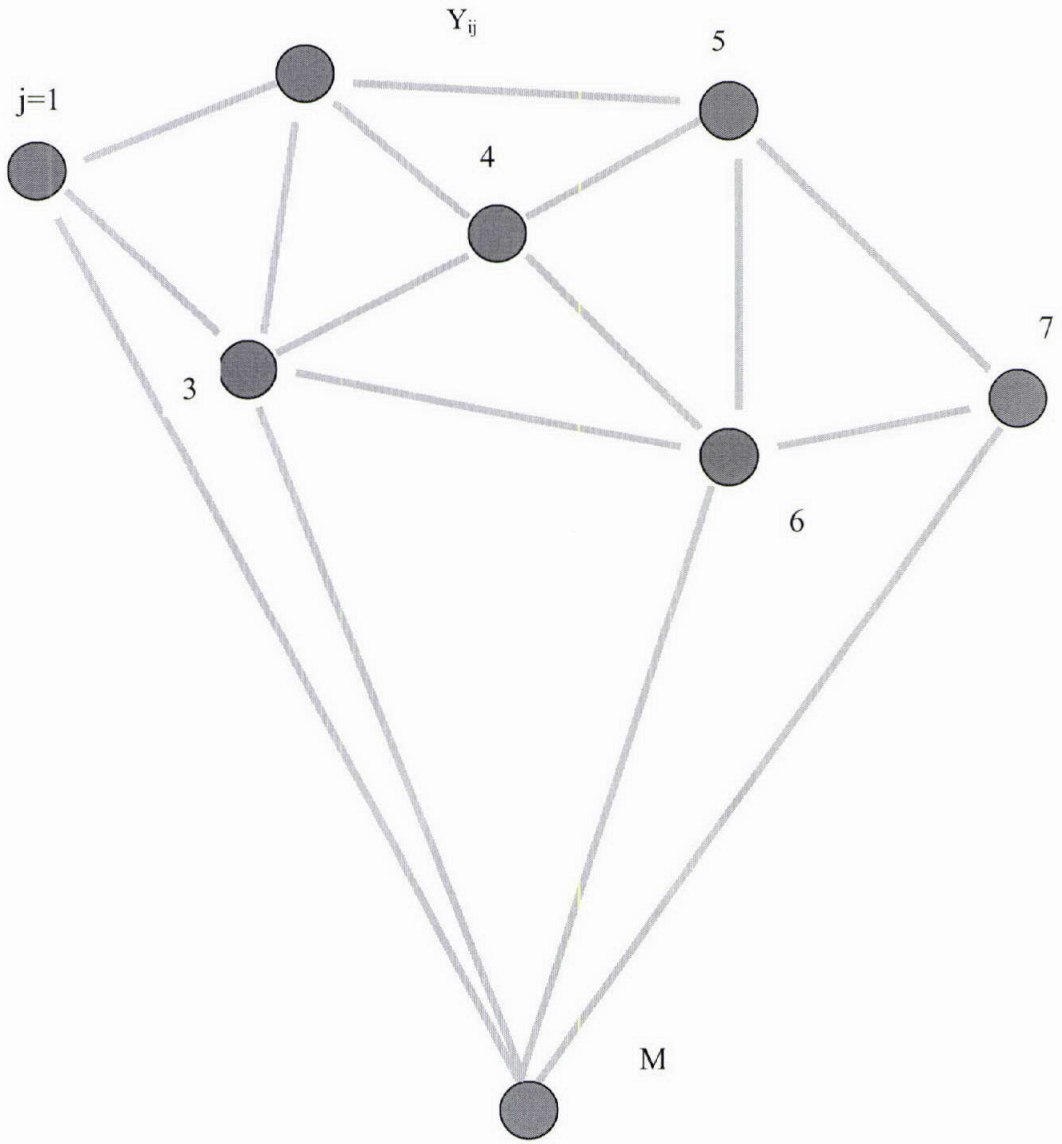


Figura 5.2: Sistema con nodo principal M.

Entonces, definiremos la variable Mj, que representará la distancia del nodo M al nodo j. Así la función objetivo resulta de la siguente forma:

sea:

α_h : costo unitario por unidad de demanda por unidad de distancia

α_m : costo unitario por unidad de demanda por unidad de distancia desde las municipalidad

Mj: distancia entre el nodo M al nodo j

Min:

$$\alpha_h \sum_i \sum_j h_i d_{ij} Y_{ij} + \sum_j \sum_k f_{jk} X_{jk} + \alpha_m \sum_i \sum_j h_i Y_{ij} M_j \quad (1)$$

La función objetivo (1) minimiza la suma del costo de transporte de la demanda entre los nodos y los servidores, el costo fijo de instalar servidores, según su tipo, en cada nodo y el costo de transportar la demanda que deberá almacenar cada servidor desde M a éste.

Debido a que las cantidades a transportar a cada servidor equivalen a la demanda que sirve cada uno de éstos, aparece una interesante oportunidad de incorporar las escalas que se pueden lograr por transportar grandes volúmenes. Estas existen dentro de un rango interesante de tonelaje, los cuales derivan en distintos tipos de camionetas y camiones que permiten economías de escala al ser usados en forma eficiente.

Para esto definiremos una variable E que representará el volumen para el cual se presentan estas economías de escala y un costo asociado C_E . Así, en un principio, se le exigirá al problema que cumpla con estas escalas para poder disminuir el costo de transporte. Así, el modelo incorpora los siguientes cambios:

sea:

E : Volumen mínimo para alcanzar la economía de escala.

C_E: Costo unitario asociado al transporte de escala por unidad de demanda por unidad de distancia.

Min:

$$\alpha_h \sum_i \sum_j h_i d_{ij} Y_{ij} + \sum_j \sum_k f_{jk} X_{jk} + C_E \sum_i \sum_j h_{ij} Y_{ij} M_j \quad (1)$$

s.a.:

$$E \sum_k X_{jk} \leq \sum_i h_{ij} Y_{ij} \quad \forall j \quad (2)$$

La función objetivo (1) minimiza la suma del costo de transporte de la demanda entre los nodos y los servidores, el costo fijo de instalar servidores, según su tipo, en cada nodo y el costo de transportar la demanda que deberá almacenar cada servidor desde M a éste.

La restricción (2) impone al modelo que los volúmenes asignados a cada servidor cumplan con la restricción de escala para poder alcanzar el nivel deseado de transporte. La sumatoria sobre X_{jk} permite que esta restricción se active sólo si hay un servidor en j, dejando libre el nodo j si este no es un servidor.

Hasta ahora, se ha omitido el hecho que la distancia entre el nodo principal (municipalidad) y cada nodo de la red a servir (poblados), es intrínsecamente variable, dado que existen múltiples caminos para llegar a ellos, mas aún si se considera que la red en cuestión es dinámica, debido a que caminos antes existentes pueden quedar deshabilitados producto del desastre o alteración en cuestión.

Es por esta razón que primero, se deberá calcular la distancia mínima entre cada nodo (que podrá ser un servidor) y el nodo principal, a esto le llamaremos

fase I. Esta tarea se realizará utilizando un modelo que permite determinar el camino más corto entre dos puntos de una red.

El modelo para minimizar la distancia entre s y t es el siguiente:

Parámetros:

d_{ij}: distancia entre i y j

Variables de decisión:

$$X_{ij}: \begin{cases} 1 & \text{si el tramo } X_{ij} \text{ se encuentra en el camino más corto.} \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

Min:

$$\sum_i \sum_j d_{ij} X_{ij} \quad (1)$$

s.a.:

$$\sum_j X_{ji} - \sum_k X_{ik} = \begin{cases} -1 & \text{si } i = s \\ 0 & \text{en otro caso} \\ 1 & \text{si } i = t \end{cases} \quad (2)$$

$$X_{ij} = 0,1 \quad (3)$$

La función objetivo (1) minimiza la distancia entre los nodos s y t. Nótese que la dirección es considerada y la solución del problema incorporará este factor.

La restricción (2) realiza un balance entre los caminos que llegan a un nodo con los que salen. Esta restricción le dará consistencia al camino elegido.

La restricción (3) es una restricción que obliga a la variable a tomar valores entre 0 y 1. Es interesante destacar que la matriz de restricciones de este problema es unimodular. Esta característica asegura que si se resuelve el problema lineal sin las restricciones enteras a las variables, estás serán igualmente enteras. Por este motivo se puede resolver el problema en forma más eficiente (sin utilizar el algoritmo branch and bound) cambiando la última restricción a:

$$X_{ij} \geq 0 \quad (3)$$

VI. IMPLEMENTACION COMPUTACIONAL

Siguiendo la idea central de esta memoria, se procederá a describir la implementación práctica de la solución planteada. El objetivo, de acuerdo a lo descrito en las primeras secciones, es crear un sistema que sea capaz de interactuar con un usuario, en forma amistosa, no necesariamente experto, para determinar una solución óptima a este tipo de problemas.

Esto se realizará mediante un ambiente SIG, que servirá como interfase para el usuario. De esta forma se permite el aprovechamiento de esta herramienta, posibilitando un ingreso de datos más fácil y permitiendo una interpretación más clara de los resultados.

La estructura de funcionamiento de la solución consiste principalmente en tres elementos:

Sistema de Información Geográfica: Este software es el encargado de realizar la interfase entre el operador y el programa. Por medio de este se efectuará el ingreso de parámetros relevantes y la lectura de los resultados. La ventaja de utilizar este sistema radica en poder apreciar topológicamente el resultado, interpretar en forma rápida los datos y ejecutar distintos escenarios con rapidez. Para una apreciación de parámetros de entrada, podrían utilizarse imágenes satelitales, las cuales permitirían determinar el estado de caminos y apreciar la magnitud y extensión de los daños.

Base de datos: En estos archivos se almacenarán los datos ingresados a través del SIG, parámetros previamente definidos y las relaciones espaciales de los elementos como caminos y nodos. También será el vínculo entre el SIG y el software que resolverá los modelos matemáticos (solver).

Solver: Este programa tomará los parámetros contenidos en las bases de datos y procederá a resolver los modelos de localización óptima de recursos discutidos en esta memoria. A su vez, ingresará los resultados en la base de datos para que sean interpretados a través del SIG.

A continuación se muestra un esquema de la operación del sistema:

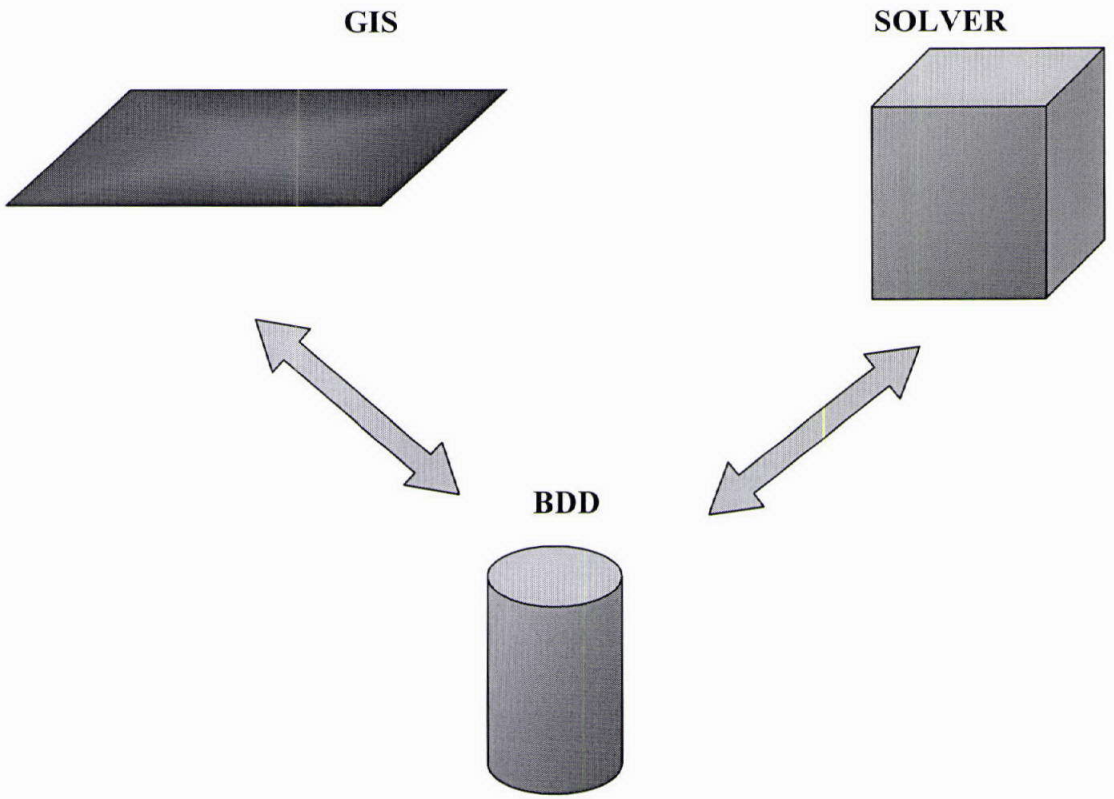


Figura 6.1: Esquema operacional del sistema.

6.1 Solver

La herramienta que se utilizará será el programa MPL de Maximal Software Inc[2], esta permite programar el modelo en forma estructurada, con lo cual se puede describir el problema por comprensión, derivando en un manejo más rápido y facil del modelo. Este programa genera el problema por extensión enviándolo a una librería que es el ejecutor de los algorítmos y cálculos que llevan a la solución del modelo. En este caso el solver propiamente tal es CPLEX[3].

En el anexo B se muestra el programa de resolución matemática que resuelve el problema. En estos se puede apreciar las facilidades que otorga este lenguage, dado que permite generar el modelo de manera análoga al que este se formula en forma matemática.

---

[2] http://www.maximal-usa.com

[2] http://www.ilog.com, actualmente la NOEMÍ no cuenta con este software.

VII. SIMULACION DE UN CASO REAL

Para ver como sería el funcionamiento de la herramienta en un caso real, se presentará el desarrollo y solución de un problema que haya sucedido efectivamente. Así, se procedió a investigar distintos sucesos de manera de poder identificar que caso podría aportar la mejor información para este ejercicio y además presentar una magnitud interesante de manera de poder observar el comportamiento del modelo. Después de investigar en los registros históricos de la ONEMI, un evento que cumple estas características fue el terremoto del 14 de octubre de 1997 que afectó principalmente a la IV región.

Un aspecto importante es el contar con una base de información histórica. Esta debe estar agrupada de modo que sirva para el uso de esta herramienta. Al no ser una necesidad en el pasado, la base no siempre fue poblada de la forma en que este estudio la necesitaba. En todo caso, si esta herramienta se utiliza en el momento del desastre, se dispondrá de la información tal como propone este trabajo.

7.1 Descripción General

Un sismo que osciló entre los II y los VIII grados de intensidad en la escala de Mercalli afectó, a las 22:03 hrs. del día 14 de Octubre de 1997, desde la II a la IX regiones. La mayor intensidad del movimiento telúrico se percibió en la IV Región, donde alcanzó características de terremoto, destrozó 19.000 viviendas, dejó ocho víctimas fatales y 59.913 damnificados.

El epicentro fue situado a 23 kilómetros al suroeste de Illapel y a 55 kilómetros al norte de La Ligua. La magnitud alcanzó a 6,8 Richter y el hipocentro o foco fue situado a 33 kilómetros de profundidad.

Posteriormente, el día 22/10/97, el servicio de Sismología de la Universidad de Chile, rectificaría el epicentro del sismo, situándolo a 10 Km al norte de Punitaqui (Latitud 30º 44,5' sur, Longitud 71º 19.7' oeste) y a una profundidad de

55 kilómetros. La magnitud se mantuvo en 6.8 Richter. En la cuarta región, el fuerte sismo ocasionó caídas de muros, daños en viviendas, edificios públicos y caminos, cortes de energía eléctrica, suspensión del sistema telefónico y un alto aislamiento de comunidades interiores.

Comenzaremos nuestro análisis mostrando la red estudiada, que está conformada por las principales comunas afectadas y la red de caminos que las unen. Un punto interesante de mencionar es que debido a la característica longilínea de nuestro país, las redes de caminos tienden a estar en una línea o a tener ciudades que convergen a un tramo central. Esto se acentúa en la zona norte, donde al existir una menor densidad poblacional y una cantidad de ciudades más baja, redunda en redes de caminos más abiertas. Sin embargo, la región afectada a estudiar, presenta una red básica cerrada lo que permite visualizar en forma interesante la acción del modelo.

Para la modelación de este problema, se tratará el tema específico de la ayuda de alimentos. Estos representan un gran volumen de carga y fueron transportados en barco hasta el puerto de Coquimbo, en donde fueron distribuidos hacia las zonas más afectadas. Por esta razón, nuestro nodo principal será esta ciudad, y la red la conformarán todos los caminos que la unen con los pueblos afectados. Si una ciudad presenta sólo un camino a Coquimbo, ésta es descartada del análisis, dado que la solución de transporte para esa ciudad es única y trivial de optimizar.

En la figura 7.1 podemos ver la red considerada para el análisis, esta está construida siguiendo la topología real de los caminos y la ubicación de las ciudades.



Figura 7.1: Red principal de caminos a considerar.

Implícita a esta, existe una matriz de distancias entre nodos, que como ya vimos en el desarrollo del modelo, servirá para identificar las rutas y determinar la solución óptima. En la tabla 7.1 se muestra esta matriz.

Tabla 7.1: Distancia entre nodos en km.

dij	Combarbalá	Monte Patria	Ovalle	Punitaqui	Vicuña	Coquimbo
Combarbalá	0	137	-	67	-	-
Monte Patria	137	0	38	-	-	-
Ovalle	-	38	0	32	154	84
Punitaqui	67	-	32	0	-	-
Vicuña	-	-	154	-	0	75
Coquimbo	-	-	84	-	75	0

7.2 Fase I

En primer lugar, se realiza el proceso de encontrar los caminos y distancias más cortas. En el anexo C, se muestra el resultado del solver, el cual indica que la distancia más corta entre Coquimbo y Combarbalá es 186 km. También se puede determinar cual es este camino, a través de la interpretación del valor de las variables (0 si el tramo no pertenece al camino, 1 si está en el camino óptimo).

Este resultado lo podemos observar gráficamente en la figura 7.2

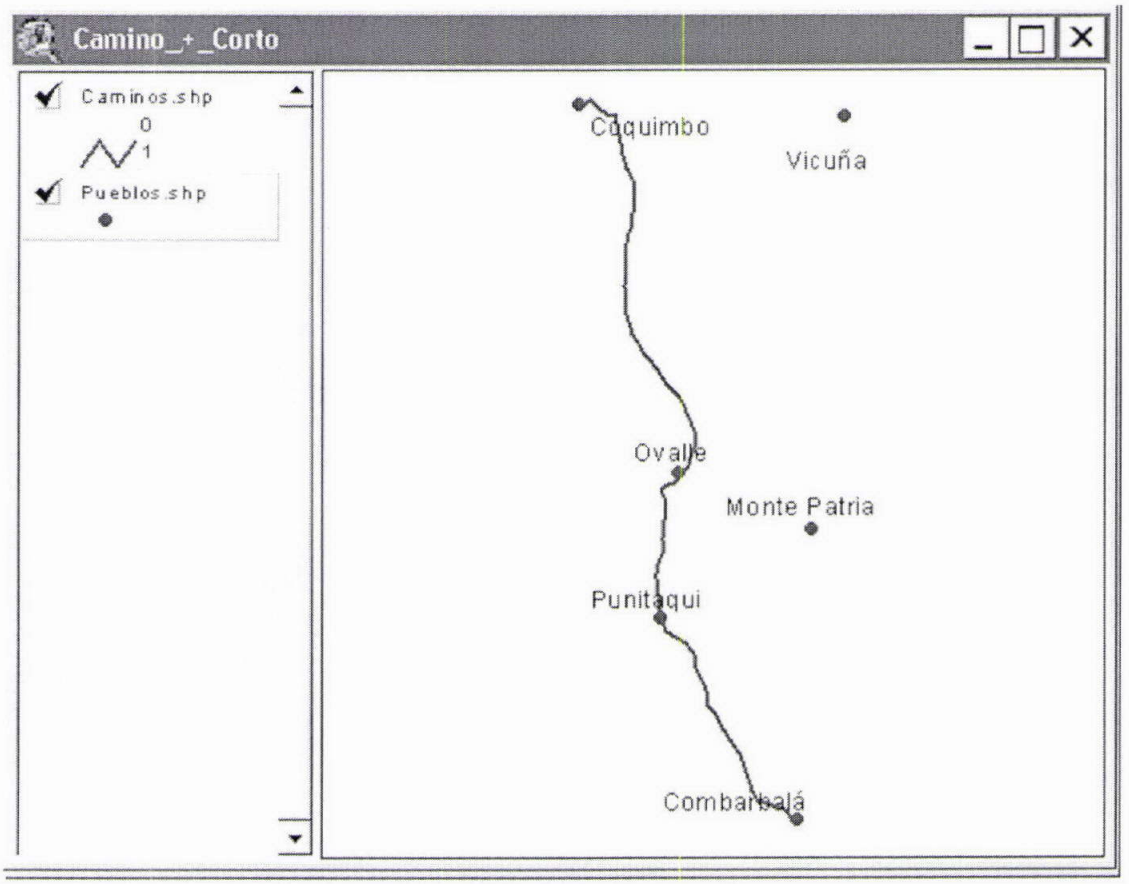


Figura 7.2: Camino más corto Coquimbo - Combarbalá.

En este momento, presentaremos una de las principales potencialidades del sistema. Esta consiste en incorporar información real sobre alguna modificación de la red, e integrar estos cambios al análisis. Como consecuencia, la solución se adaptará a la topología modificada de la red. Observaremos que este cambio tiene consecuencias tanto en la primera fase, como en la segunda.

Para el caso real en estudio, la ruta Punitaqui - Combarbalá resultó afectada seriamente por el sismo[4], quedando inhabilitada para su uso, lo cual debe ser incorporado al sistema. En consecuencia, la distancia más corta entre Coquimbo y

[4] Situación de Vialidad, Sismo del 14 de octubre de 1997, ONEMI.

Combarbalá es 259 km, y la ruta óptima es la que se muestra en la figura 7.3. y está desarrollada en el anexo D.

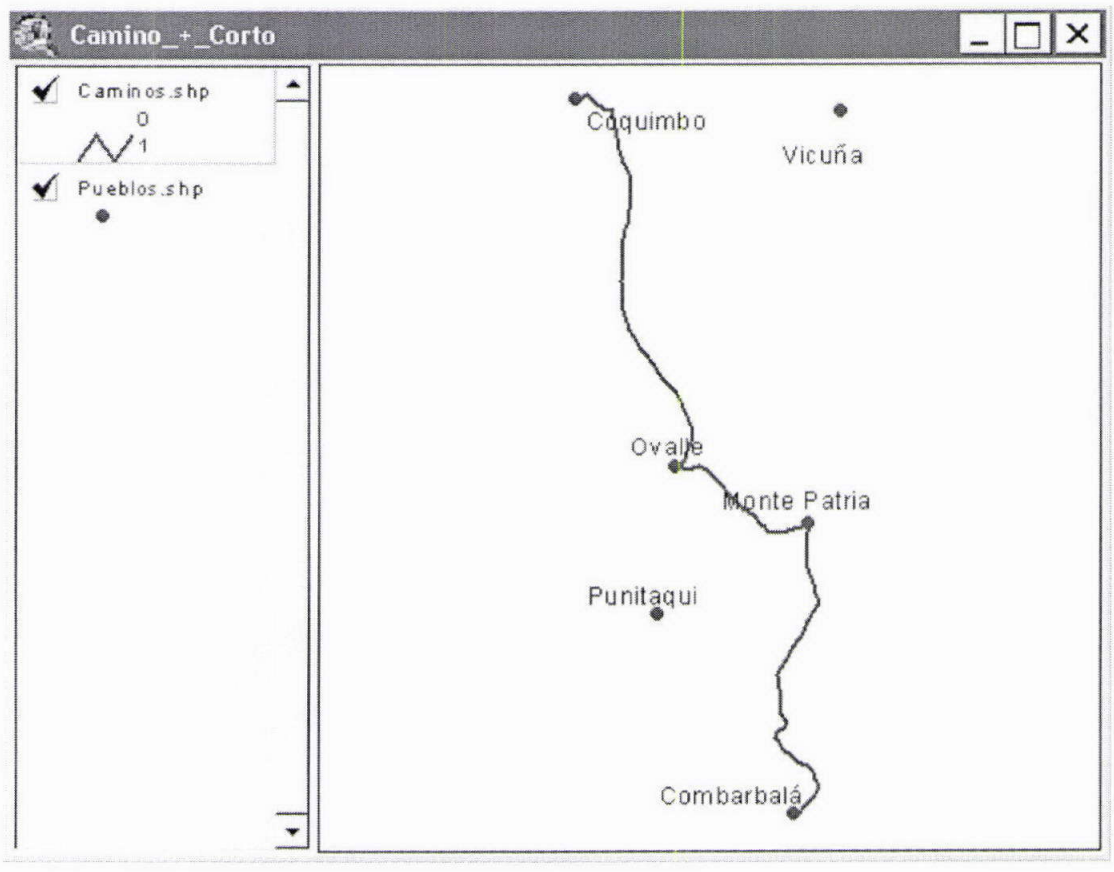


Figura 7.3: Camino más corto Coquimbo - Combarbalá actualizado.

En las figuras 7.4, 7.5, 7.6, 7.7 y en el anexo E, se muestran las soluciones para las localidades de Punitaquí, Monte Patria, Ovalle y Vicuña respectivamente.

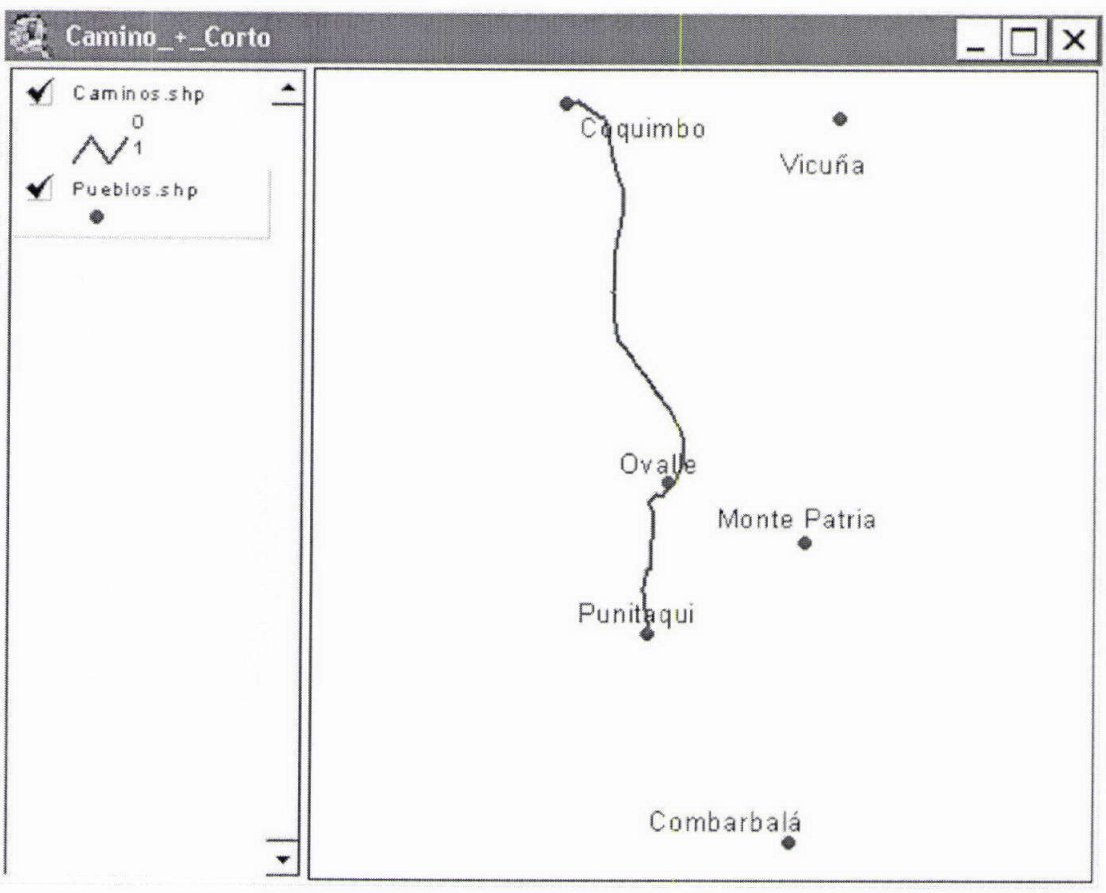


Figura 7.4: Camino más corto a Punitaqui.

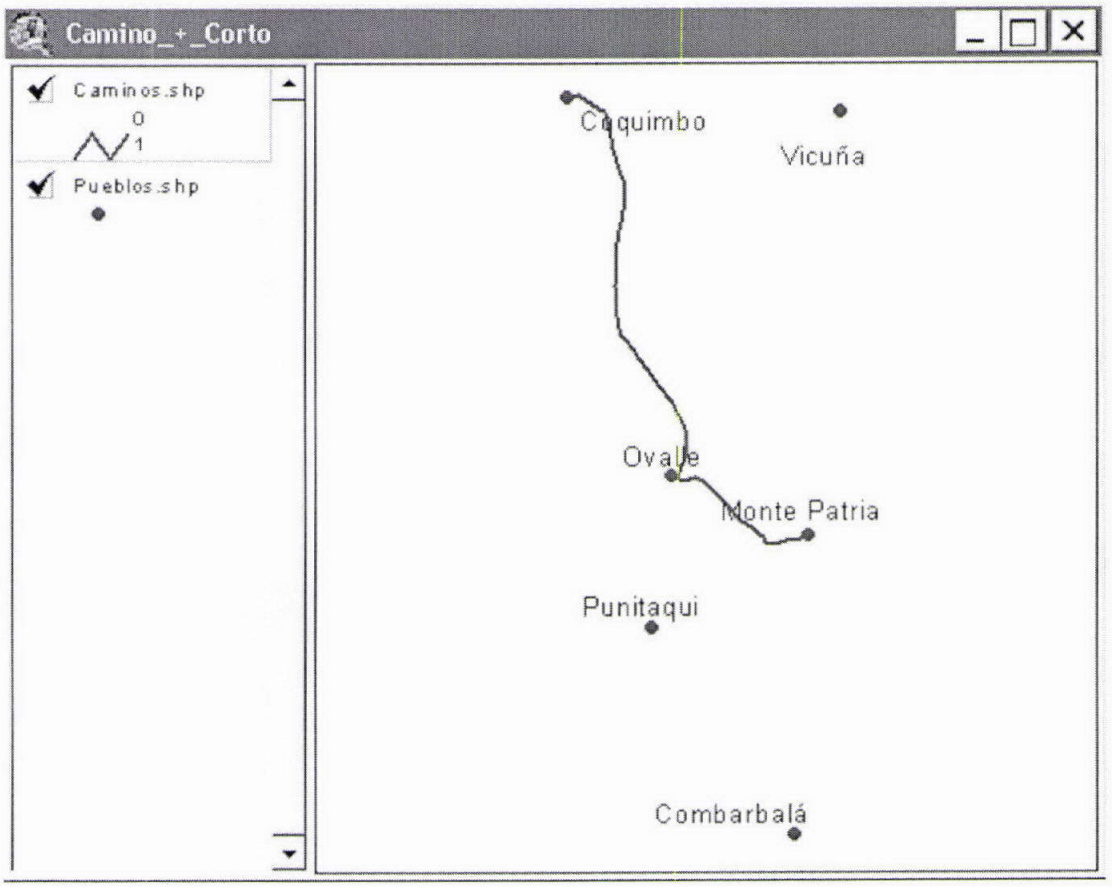


Figura 7.5: Camino más corto Monte Patria.

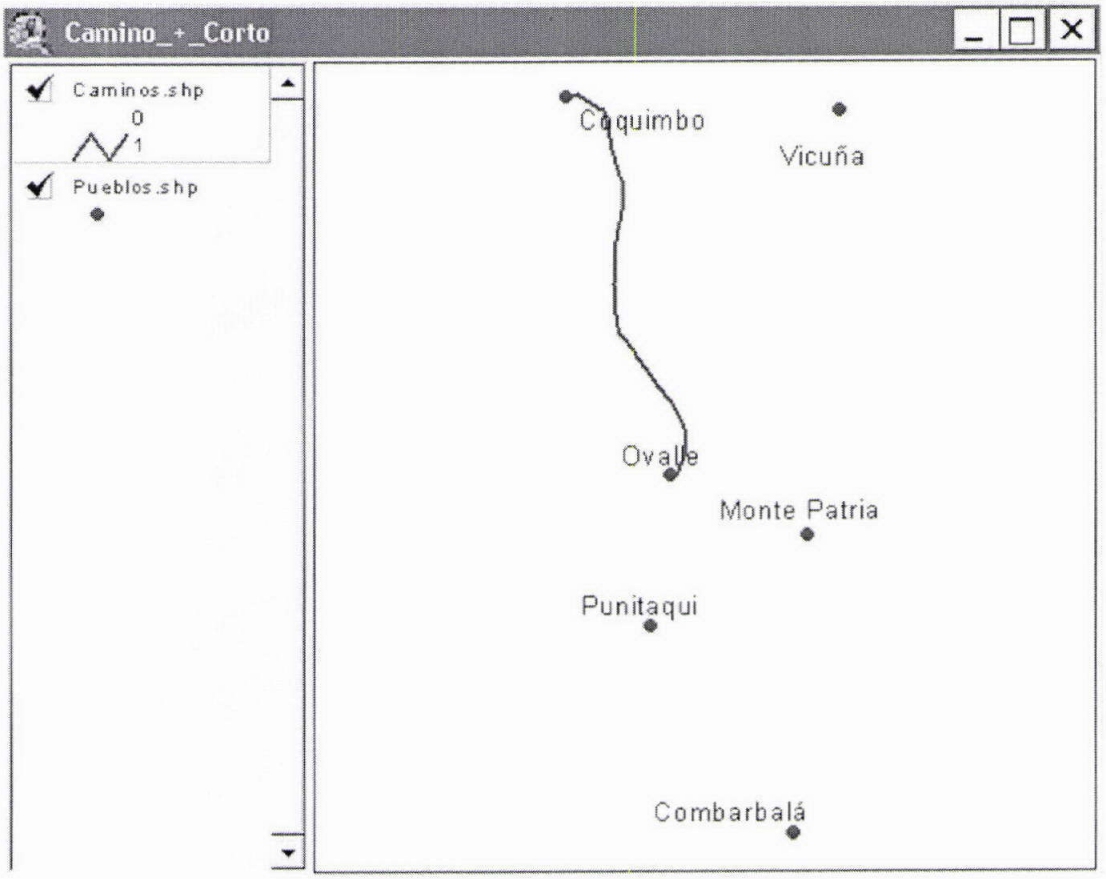


Figura 7.6: Camino más corto Ovalle.

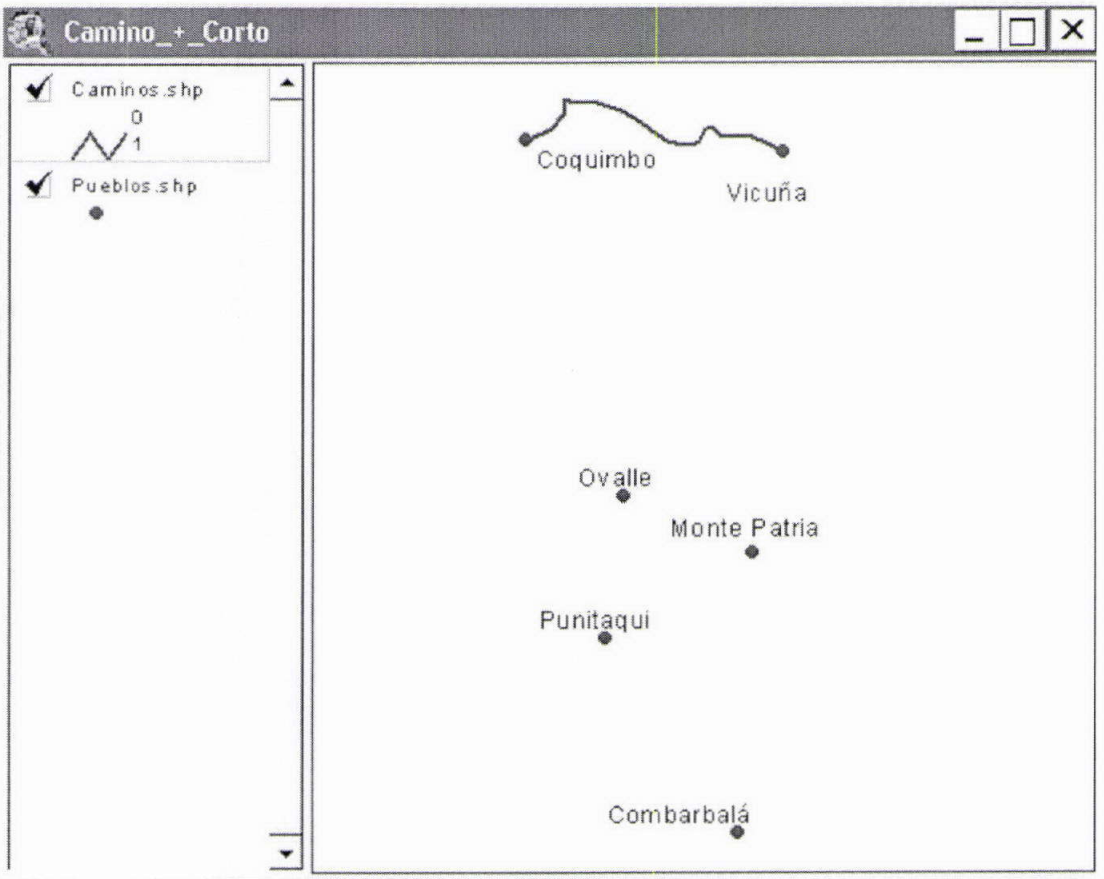


Figura 7.7: Camino más corto Vicuña.

Luego de estos procesos, se obtienen las distancias mínimas a cada nodo las que conformarán la matriz Mj de la formulación y que se muestra en la tabla 7.2.

Es interesante notar que efectivamente se cumple que las soluciones son enteras a pesar de no existir una restricción explícita para ello, como se explica en el capítulo V y resultado que se puede observar en el anexo D.

Tabla 7.2: Matriz de distancias mínimas Mj en Km.

Mj	Combarbalá	Monte Patria	Ovalle	Punitaqui	Vicuña
Coquimbo	259	122	84	116	75

7.3 Fase II

En esta etapa realizaremos la modelación de la distribución desde el nodo principal hasta las distintas localidades necesitadas. Empezaremos con el análisis de lo que se debe transportar. Para este caso se eligió simular el traslado de los alimentos distribuidos. Estos se embalan en cajas estándar de 43 x 23 x 29 cm, pesan 15 Kg[5] y contienen alimentos destinados a auxiliar una familia promedio por una semana.

El objetivo principal de esta optimización es satisfacer la demanda, derivada de los procedimientos normalizados, para cada nodo a un costo mínimo. Sin embargo, es de suma importancia no dejar un criterio esencial en la distribución de ayuda en casos de emergencia, el cual es el tiempo de respuesta. Por esta razón se debe salvaguardar el tiempo estimado para este proceso. Esto se logra determinando

[5] Fuente: ONEMI

la cantidad de vehículos a utilizar en función de la solución del problema. Las demandas a servir se muestran en la tabla 7.3

Tabla 7.3: Demanda de cajas de alimentos por localidades[6].

	Combarbalá	Monte Patria	Ovalle	Punitaqui	Vicuña
cajas	3.503	4.070	5.711	2.910	1.832

Se debe considerar ahora dos aspectos, el primero es el peso de la carga a transportar y el segundo el volumen. A partir de la información anterior, derivamos el peso en toneladas, en la tabla 7.4, de la carga a transportar.

Tabla 7.4: Demanda en toneladas de alimentos por localidades.

hi	Combarbalá	Monte Patria	Ovalle	Punitaqui	Vicuña
Ton	53	61	86	44	27

7.3.1 Métodos de Transporte

Una vez definida la demanda, es necesario analizar los medios de transportes que se utilizarán. Para esto es necesario distinguir entre el transporte a escala y el de menor tonelaje. El primero es esencial dado que nos permitirá, según se ha explicado anteriormente en la modelación del problema, conseguir economías de escala mediante la agrupación de demanda en ciertos nodos.

---

[6] Fuente: Intendencia Regional de Coquimbo.

Debido a que conseguir la mejor escala posible es uno de nuestros objetivos, utilizaremos el medio que permita el mejor rendimiento por peso transportado. A continuación se presentan distintos tipos de camiones con sus costos de transporte asociados.

Tabla 7.5: Costo de transporte por tipo de camión[7].

Toneladas	$/Ton-Km
1.5	403
5.0	128
10	69
40	32

Con estos datos se selecciona el camión de 40 ton como el transporte que presenta más economías. Junto con esto se debe verificar la dimensión volumétrica. Para esta clase de camión el volumen de carga total es de 70 m3. Con estos datos, podemos determinar que cada uno de estos camiones puede transportar 2.000 cajas de alimentos, lo que genera una carga de 30 ton por camión, ocupando un volumen teórico de estiba de 58 m3. Con este resultado determinaremos que la cantidad mínima para que se alcance escala de transporte debe permitir al menos cumplir con dos cargas, de manera de asegurar un aprovechamiento de los recursos de transporte. El transporte estándar se realizará con camiones de 5 toneladas, que es el que comúnmente se utiliza y es la solución típica para el transporte de carga terrestre a mediana escala.

[7] Fuente: Teleflet.

7.3.2 Nodos Servidores

Es importante señalar que el concepto de bodega debe cumplir el rol de punto de transferencia y no necesariamente de punto de acopio. Esto se debe a que la variable temporal en estos procesos es muy importante, resultando así que estos puntos deben ser usados uno o dos días a lo sumo. Esto las transforma en "Bodegas Virtuales" dado que su existencia dura por un período muy corto de tiempo y que para este fin son utilizados en general lugares ya existentes como salas de clases, gimnasios u otro tipo de recinto cuya finalidad no es explícitamente el acopio de carga sino otro. Esto conlleva principalmente dos consecuencias, la primera es que no es necesario poseer una estructura rígida ni predefinida de bodegas en cada localidad, y la segunda es que el costo de utilizar estos espacios para dicho fin es mínima, y sólo consiste en pequeñas adecuaciones de los lugares que realizarán esta función. Dado que este costo es muy pequeño comparado con las otras magnitudes del problema, no es necesario una investigación intensiva para determinar estos. Para este fin se utilizarán valores estimados que se derivan del arriendo de bodegas (aunque en realidad se trata solamente de una adaptación), de esta forma nos aseguraremos de no considerar un valor que pudiera ser demasiado bajo. Esto se muestra en la tabla 1.6:

Tabla 7.6: Costo de habilitación de puntos de transferencia[8].

Capacidad Ton	Cto. Habilit. $
60	80.000
120	160.000
180	240.000

[8] Fuente: COSAN.

7.4 RESULTADOS

7.4.1 Interpretación Gráfica

En la figura 7.8, se muestra la representación del resultado en la base de datos geográfica. Esta contempla el uso de estaciones de transferencia en Montepatria y Ovalle. En la primera, se utilizará una estación del tipo 2 que servirá a la ciudad de Combarbalá. El segundo servidor es de tipo 3 el que serviría a Punitaqui y a Vicuña. Estos resultados se interpretan de la resolución del modelo que se encuentra en el anexo F.

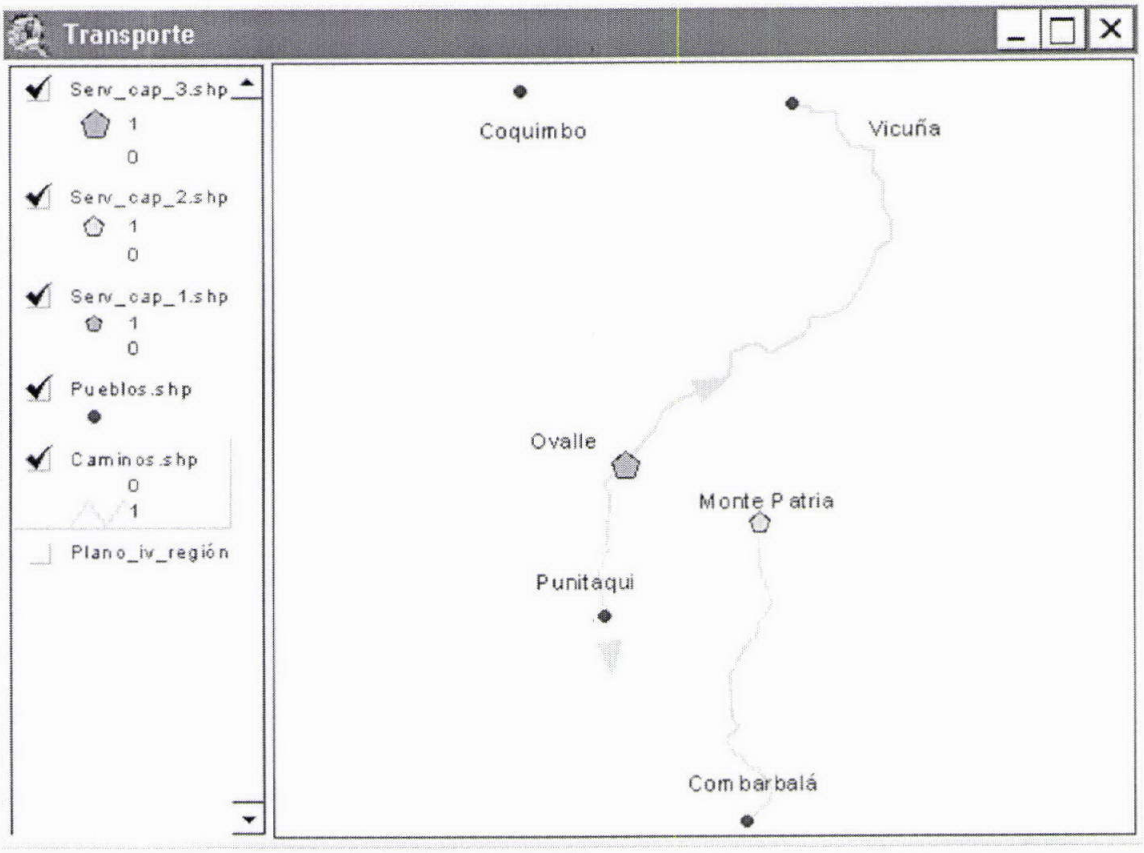


Figura 7.8: Resultado Final

7.4.2 Costos

Del valor de la función objetivo del anexo F, se desprenden las componentes del resultado que se detallan en la tabla 7.7, resultando un costo total de S 2.908.928.

Tabla 7.7 Costos de Transporte

Actividad	Cto. Transporte $
Trasporte a Nodos Servidos	1.641.856
Nodos de Transferencia	400.000
Transporte a Nodos Servidores	867.072
Costo Total	2.908.928

Vemos que a pesar que toda la carga es transportada a los servidores, el valor de este transporte es mucho menor que el que se realiza a los nodos servidos. También se aprecia que la magnitud del costo en los nodos de transferencia es mucho menor que el costo destinado al transporte a localidades servidoras y servidas.

En la figura 7.9 se presenta el resultado del modelo en el caso que la vía Punitaquí – Combarbalá no hubiese sido inhabilitada. Se puede apreciar que ahora los nodos servidores son Montepatria, Ovalle y Punitaqui, sirviendo los dos últimos a Vicuña y Combarbalá respectivamente.

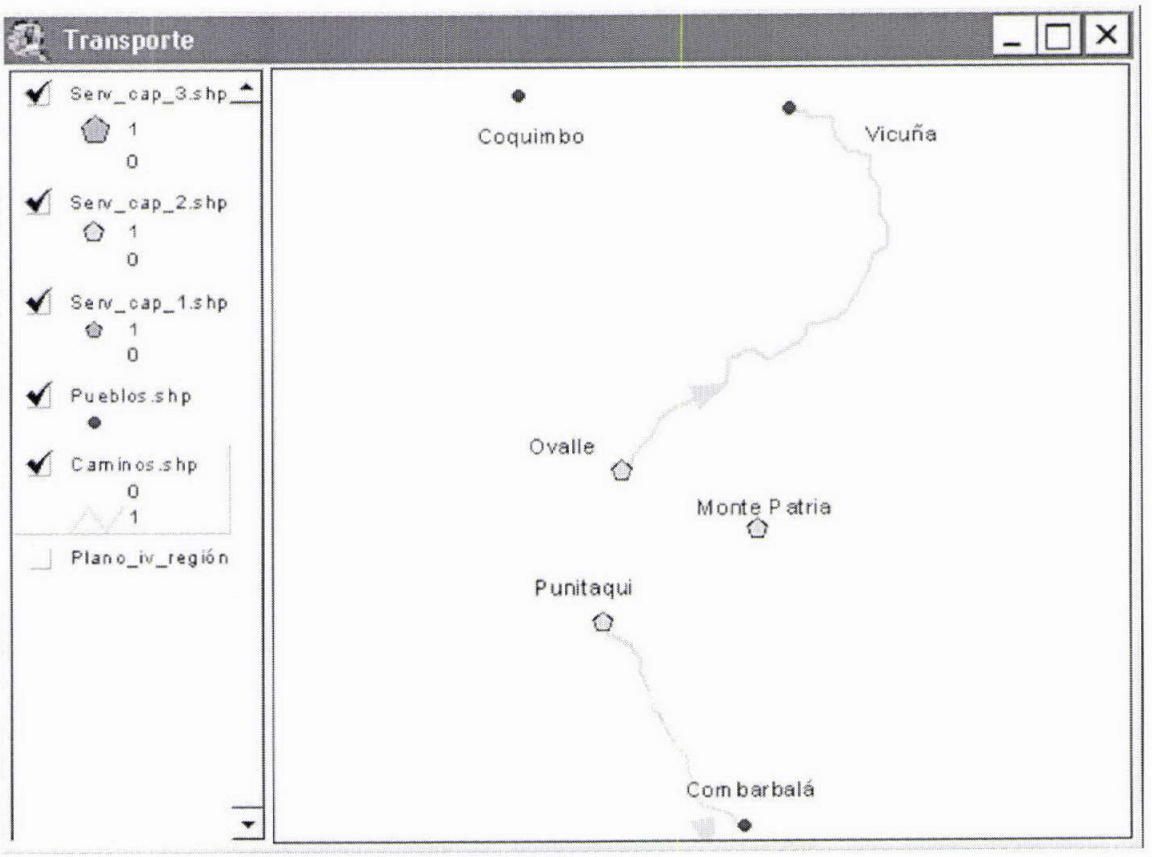


Figura 7.9: Resultado Sin Restricción de camino.

Este cuadro, es la interpretación gráfica de la solución que se encuentra en el anexo G. En la tabla 7.8 se muestran los valores que componen la función objetivo que genera un costo total de $ 2.368.704

Tabla 7.8 Costos de transporte del caso base modificado.

Actividad	Cto. Transporte $
Trasporte a Nodos Servidos	986.752
Nodos de Transferencia	480.000
Transporte a Nodos Servidores	901.952
Costo Total	2.368.704

Se ve que el costo total es menor producto que al no existir restricciones en ningún camino, la solución genera el menor costo posible dado la red existente de caminos. Por último compararemos esta solución versus ejecutar el transporte por un medio estándar. Este costo sería:

$Mj \times hi \times \alpha h = \$\ 4.050.772$

Lo que resulta un 71% superior a la solución optimizada.

Es importante recalcar que esta metodología está sujeta a que la organización política administrativa del país permita una resolución de esta clase. Esto no es siempre posible debido a que por ley, muchas veces la asignación y distribución de recursos se derivan por medios políticos administrativos previamente definidos para un sinnúmero de problemas y no necesariamente en forma específica para emergencias o más aún para la distribución de estas.

Por este motivo, este trabajo no pretende abstraerse de estas posibles limitaciones, si no que mostrar cómo podría aplicarse una metodología al trasporte de ayuda y que beneficios se podrían obtener con la aplicación de estas.

ANEXO A : EXPERIENCIAS DE APLICACIÓN DE LOS SIG EN ONEMI

Como una forma de avanzar en el proceso de implantación de la tecnología S.I.G han realizado una serie de aplicaciones. Estas tuvieron por objetivo apoyar el proceso de demostración, en términos reales, de las potencialidades de aplicación de los SIG en el ámbito de los Desastres, dejando de manifiesto sus beneficios. Estas han sido:

- Mapa de riesgo sísmico, realizado en la I región del país en una escala 1: 1.000.000 el cual se inserta dentro de la categoría de microzonificación de riesgos que en definitiva lo que proporciona es la posibilidad de tener una visión global de amenazas e identificar una zona de riesgo que será necesario de estudiar más a fondo.

- Mapa de Riesgo Lahárico, Volcán Villarrica, esta aplicación, desarrollada en una escala 1:250.000, corresponde a una microzonificación de riesgos, y en ella se muestran los efectos que generarían sobre las comunidades e infraestructura urbano/rural de la zona inmediata al Volcán Villarrica.

- Mapa de Riesgo de Accidentes con Sustancias Peligrosas en la Comuna de La Reina, esta aplicación que determina el riesgo al que se enfrenta una población, concebido a escala comunal (esc. 1:5.000) permite orientar una serie de programas de preparación hacia la población, sin embargo también permite orientar a aquellas entidades que tienen la misión de combatir los efectos de un desastre de esta naturaleza (p.ej. Bomberos) de forma tal que su acción sea segura para ellos y la población potencialmente afectada.

- Simulación del área de incidencia de un accidente con sustancias peligrosas, realizada en el puerto de Valparaíso, V región del país aplicando el software Aloha y Marplot sobre una ortofoto digital escala 1:60.000. Esta aplicación lo que permite es realizar una simulación de áreas afectadas en accidentes con sustancias peligrosas en forma dinámica, incluyendo fáctores climáticos y características propias de la sustancia.

ANEXO B : PROGRAMA DE RESOLUCION MATEMÁTICA

```
title

modelo_tranporte

index

nodo := DATABASE("nodos","nodos");

k:=(1..3);

i:=nodo;

j:=nodo;

data

d[i,j]:= DATABASE("d","d",i="I",j="J");

M[j]:=DATABASE("M","M",j="j");

h[i]:=DATABASE("h","h",i="i");

f[k]:=DATABASE("f_Kb","f",k="k");

Kb[k]:=DATABASE("f_Kb","Kb",k="k");

E:=60;

Ah:=128;

Ce:=32;

binary variables

X[j,k] EXPORT REFILL TO DATABASE ("X","X",j="j",k="k");
```

```
Y[i,j] where (d[i,j] <> -1) EXPORT REFILL TO DATABASE
("Y","Y",i="i",j="j");

macros

transpueblo:= Ah * sum(i,j:h*d*Y);

costoacopio:= sum(j,k:X*f);

transmunicipal:= Ce * sum(i,j:h*Y*M);

model

min costo_total = transpueblo + costoacopio + transmunicipal;

subject to

demservida[i] -> dser:

sum(j:Y) = 1;

cap_exi_serv[j] {where (d[i,j] <> -1)} -> cser:

sum(i:h*Y) <= sum(k:Kb*X);

unabodega[j]-> unabod:

sum(k:X) <= 1;

economiaescala[j] {where (d[i,j] <> -1)} -> eesc:

E*sum(k:X) <= sum(i:h*Y);

autoserv[i,j] where (d[i,j] = 0) -> ausr:

Y = sum(k:X) ;

end
```

Por otro lado el modelo de ruta mínima es el siguente:

```
title

camino_corto

index

nodo := DATABASE("nodosc","nodos");

i:=nodo;

j:=nodo;

data

s:=6;

t:=1;

d[i,j]:= DATABASE("dc","d",i="i",j="j");

variables

X[i,j] where (d[i,j]<>-1)

EXPORT REFILL TO DATABASE ("M1","X",i="i",j="J");

macros

distancia_total:= sum(i,j:d*X);

model

min distancia_total;

subject to
```

balance1[i,j] where (i=j and i<>s and j<>s and i<>t and j<>t) -> bal1:

sum(i:X) - sum(j:X) =0;

balance2[i,j] where (i=t and j=t) -> bal2:

sum(i:X) - sum(j:X) =1;

balance3[i,j] where (i=s and j=s) -> bal3:

sum(i:X) - sum(j:X) =-1;

Positivo[i,j]:

X>=0;

end

ANEXO C : CAMINO MÁS CORTO COQUIMBO - COMBARBALÁ

```
Constraints:        26
Variables:          20
Nonzeros:           54
Density:            10 %

SOLUTION RESULT

  Optimal solution found

    MIN Z         =         183.0000

MACROS

   Macro Name                                    Values
 ------------------------------------------------------
   distancia_total                             183.0000
 ------------------------------------------------------

DECISION VARIABLES

VARIABLE X[i,j] :

    i  j          Activity     Reduced Cost
 ------------------------------------------
   1  1            0.0000           0.0000
   1  2            0.0000         274.0000
   1  4            0.0000         134.0000
   2  1            0.0000           0.0000
   2  2            0.0000           0.0000
   2  3            0.0000           0.0000
   3  2            0.0000          76.0000
   3  3            0.0000           0.0000
   3  4            1.0000           0.0000
   3  5            0.0000         308.0000
   3  6            0.0000         168.0000
   4  1            1.0000           0.0000
   4  3            0.0000          64.0000
   4  4            0.0000           0.0000
   5  3            0.0000           0.0000
```

5	5	0.0000	0.0000
5	6	0.0000	5.0000
6	3	1.0000	0.0000
6	5	0.0000	145.0000
6	6	0.0000	0.0000

CONSTRAINTS

CONSTRAINT balance1[i,j] :

i	j	Slack	Shadow Price
2	2	0.0000	-70.0000
3	3	0.0000	-32.0000
4	4	0.0000	0.0000
5	5	0.0000	-186.0000

CONSTRAINT balance2[i,j] :

i	j	Slack	Shadow Price
1	1	0.0000	67.0000

CONSTRAINT balance3[i,j] :

i	j	Slack	Shadow Price
6	6	0.0000	-116.0000

CONSTRAINT Positivo[i,j] :

i	j	Slack	Shadow Price
1	1	0.0000	0.0000
1	2	0.0000	0.0000
1	4	0.0000	0.0000
2	1	0.0000	0.0000
2	2	0.0000	0.0000
2	3	0.0000	0.0000
3	2	0.0000	0.0000
3	3	0.0000	0.0000
3	4	-1.0000	0.0000

3	5	0.0000	0.0000
3	6	0.0000	0.0000
4	1	-1.0000	0.0000
4	3	0.0000	0.0000
4	4	0.0000	0.0000
5	3	0.0000	0.0000
5	5	0.0000	0.0000
5	6	0.0000	0.0000
6	3	-1.0000	0.0000
6	5	0.0000	0.0000
6	6	0.0000	0.0000

END

ANEXO D : CAMINO MÁS CORTO COQUIMBO - COMBARBALÁ

ACTUALIZADO

```
Constraints:        24
Variables:          18
Nonzeros:           48
Density:            11 %
```

SOLUTION RESULT

Optimal solution found

MIN Z = 259.0000

MACROS

Macro Name	Values
distancia_total	259.0000

DECISION VARIABLES

VARIABLE X[i,j] :

i	j	Activity	Reduced Cost
1	1	0.0000	0.0000
1	2	0.0000	274.0000
2	1	1.0000	0.0000
2	2	0.0000	0.0000
2	3	0.0000	76.0000
3	2	1.0000	0.0000
3	3	0.0000	0.0000
3	4	0.0000	0.0000
3	5	0.0000	308.0000
3	6	0.0000	168.0000
4	3	0.0000	64.0000

4	4	0.0000	0.0000
5	3	0.0000	0.0000
5	5	0.0000	0.0000
5	6	0.0000	5.0000
6	3	1.0000	0.0000
6	5	0.0000	145.0000
6	6	0.0000	0.0000

CONSTRAINTS

CONSTRAINT balance1[i,j] :

i	j	Slack	Shadow Price
2	2	0.0000	-137.0000
3	3	0.0000	-175.0000
4	4	0.0000	-143.0000
5	5	0.0000	-329.0000

CONSTRAINT balance2[i,j] :

i	j	Slack	Shadow Price
1	1	0.0000	0.0000

CONSTRAINT balance3[i,j] :

i	j	Slack	Shadow Price
6	6	0.0000	-259.0000

CONSTRAINT Positivo[i,j] :

i	j	Slack	Shadow Price
1	1	0.0000	0.0000
1	2	0.0000	0.0000
2	1	-1.0000	0.0000
2	2	0.0000	0.0000
2	3	0.0000	0.0000
3	2	-1.0000	0.0000
3	3	0.0000	0.0000

3	4	0.0000	0.0000
3	5	0.0000	0.0000
3	6	0.0000	0.0000
4	3	0.0000	0.0000
4	4	0.0000	0.0000
5	3	0.0000	0.0000
5	5	0.0000	0.0000
5	6	0.0000	0.0000
6	3	-1.0000	0.0000
6	5	0.0000	0.0000
6	6	0.0000	0.0000

END

ANEXO E : CAMINO MÁS CORTO A PUNITAQUI, MONTEPATRIA, OVALLE Y VICUÑA.

```
Constraints:        24
Variables:          18
Nonzeros:           48
Density:            11 %


SOLUTION RESULT

  Optimal solution found

    MIN Z         =         116.0000


MACROS

    Macro Name                                    Values
  ------------------------------------------------------
    distancia_total                            116.0000
  ------------------------------------------------------


DECISION VARIABLES

VARIABLE X[i,j] :

    i  j           Activity     Reduced Cost
  ------------------------------------------
    1  1             0.0000           0.0000
    1  2             0.0000         274.0000
    2  1             0.0000           0.0000
    2  2             0.0000           0.0000
    2  3             0.0000          76.0000
    3  2             0.0000           0.0000
    3  3             0.0000           0.0000
    3  4             1.0000           0.0000
    3  5             0.0000         308.0000
    3  6             0.0000         168.0000
    4  3             0.0000          64.0000
    4  4             0.0000           0.0000
```

5	3	0.0000	0.0000
5	5	0.0000	0.0000
5	6	0.0000	5.0000
6	3	1.0000	0.0000
6	5	0.0000	145.0000
6	6	0.0000	0.0000

CONSTRAINTS

CONSTRAINT balance1[i,j] :

i	j	Slack	Shadow Price
1	1	0.0000	143.0000
2	2	0.0000	6.0000
3	3	0.0000	-32.0000
5	5	0.0000	-186.0000

CONSTRAINT balance2[i,j] :

i	j	Slack	Shadow Price
4	4	0.0000	0.0000

CONSTRAINT balance3[i,j] :

i	j	Slack	Shadow Price
6	6	0.0000	-116.0000

CONSTRAINT Positivo[i,j] :

i	j	Slack	Shadow Price
1	1	0.0000	0.0000
1	2	0.0000	0.0000
2	1	0.0000	0.0000
2	2	0.0000	0.0000
2	3	0.0000	0.0000
3	2	0.0000	0.0000
3	3	0.0000	0.0000
3	4	-1.0000	0.0000

3	5	0.0000	0.0000
3	6	0.0000	0.0000
4	3	0.0000	0.0000
4	4	0.0000	0.0000
5	3	0.0000	0.0000
5	5	0.0000	0.0000
5	6	0.0000	0.0000
6	3	-1.0000	0.0000
6	5	0.0000	0.0000
6	6	0.0000	0.0000

END

Camino más corto a Monte Patria.

Constraints: 24
Variables: 18
Nonzeros: 48
Density: 11 %

SOLUTION RESULT

Optimal solution found

MIN Z = 122.0000

MACROS

Macro Name	Values
distancia_total	122.0000

DECISION VARIABLES

VARIABLE X[i,j] :

i	j	Activity	Reduced Cost
1	1	0.0000	0.0000
1	2	0.0000	274.0000
2	1	0.0000	0.0000
2	2	0.0000	0.0000
2	3	0.0000	76.0000
3	2	1.0000	0.0000
3	3	0.0000	0.0000
3	4	0.0000	0.0000
3	5	0.0000	163.0000
3	6	0.0000	168.0000
4	3	0.0000	64.0000
4	4	0.0000	0.0000
5	3	0.0000	145.0000
5	5	0.0000	0.0000
5	6	0.0000	150.0000
6	3	1.0000	0.0000
6	5	0.0000	0.0000
6	6	0.0000	0.0000

CONSTRAINTS

CONSTRAINT balance1[i,j] :

i	j	Slack	Shadow Price
1	1	0.0000	137.0000
3	3	0.0000	-38.0000
4	4	0.0000	-6.0000
5	5	0.0000	-47.0000

CONSTRAINT balance2[i,j] :

i	j	Slack	Shadow Price
2	2	0.0000	0.0000

CONSTRAINT balance3[i,j] :

i	j	Slack	Shadow Price
6	6	0.0000	-122.0000

CONSTRAINT Positivo[i,j] :

i	j	Slack	Shadow Price
1	1	0.0000	0.0000
1	2	0.0000	0.0000
2	1	0.0000	0.0000
2	2	0.0000	0.0000
2	3	0.0000	0.0000
3	2	-1.0000	0.0000
3	3	0.0000	0.0000
3	4	0.0000	0.0000
3	5	0.0000	0.0000
3	6	0.0000	0.0000
4	3	0.0000	0.0000
4	4	0.0000	0.0000
5	3	0.0000	0.0000
5	5	0.0000	0.0000
5	6	0.0000	0.0000
6	3	-1.0000	0.0000
6	5	0.0000	0.0000
6	6	0.0000	0.0000

END

Camino más corto a Ovalle.

Constraints: 24
Variables: 18
Nonzeros: 48
Density: 11 %

SOLUTION RESULT

Optimal solution found

MIN Z = 84.0000

MACROS

Macro Name	Values
distancia_total	84.0000

DECISION VARIABLES

VARIABLE X[i,j] :

i	j	Activity	Reduced Cost
1	1	0.0000	0.0000
1	2	0.0000	274.0000
2	1	0.0000	0.0000
2	2	0.0000	0.0000
2	3	0.0000	76.0000
3	2	0.0000	0.0000
3	3	0.0000	0.0000
3	4	0.0000	0.0000
3	5	0.0000	163.0000
3	6	0.0000	168.0000
4	3	0.0000	64.0000
4	4	0.0000	0.0000
5	3	0.0000	145.0000
5	5	0.0000	0.0000
5	6	0.0000	150.0000
6	3	1.0000	0.0000
6	5	0.0000	0.0000
6	6	0.0000	0.0000

CONSTRAINTS

CONSTRAINT balance1[i,j] :

i	j	Slack	Shadow Price
1	1	0.0000	175.0000
2	2	0.0000	38.0000
4	4	0.0000	32.0000
5	5	0.0000	-9.0000

CONSTRAINT balance2[i,j] :

i	j	Slack	Shadow Price
3	3	0.0000	0.0000

CONSTRAINT balance3[i,j] :

i	j	Slack	Shadow Price
6	6	0.0000	-84.0000

CONSTRAINT Positivo[i,j] :

i	j	Slack	Shadow Price
1	1	0.0000	0.0000
1	2	0.0000	0.0000
2	1	0.0000	0.0000
2	2	0.0000	0.0000
2	3	0.0000	0.0000
3	2	0.0000	0.0000
3	3	0.0000	0.0000
3	4	0.0000	0.0000
3	5	0.0000	0.0000
3	6	0.0000	0.0000
4	3	0.0000	0.0000
4	4	0.0000	0.0000
5	3	0.0000	0.0000
5	5	0.0000	0.0000
5	6	0.0000	0.0000
6	3	-1.0000	0.0000
6	5	0.0000	0.0000
6	6	0.0000	0.0000

END

Camino más corto a Vicuña.

Constraints:	24
Variables:	18
Nonzeros:	48
Density:	11 %

SOLUTION RESULT

Optimal solution found

MIN Z = 75.0000

MACROS

Macro Name	Values
distancia_total	75.0000

DECISION VARIABLES

VARIABLE X[i,j] :

i	j	Activity	Reduced Cost
1	1	0.0000	0.0000
1	2	0.0000	274.0000
2	1	0.0000	0.0000
2	2	0.0000	0.0000
2	3	0.0000	76.0000
3	2	0.0000	0.0000
3	3	0.0000	0.0000
3	4	0.0000	0.0000
3	5	0.0000	163.0000
3	6	0.0000	168.0000
4	3	0.0000	64.0000
4	4	0.0000	0.0000
5	3	0.0000	145.0000
5	5	0.0000	0.0000
5	6	0.0000	150.0000
6	3	0.0000	0.0000
6	5	1.0000	0.0000
6	6	0.0000	0.0000

CONSTRAINTS

CONSTRAINT balance1[i,j] :

i	j	Slack	Shadow Price
1	1	0.0000	184.0000
2	2	0.0000	47.0000
3	3	0.0000	9.0000
4	4	0.0000	41.0000

CONSTRAINT balance2[i,j] :

i	j	Slack	Shadow Price
5	5	0.0000	0.0000

CONSTRAINT balance3[i,j] :

i	j	Slack	Shadow Price
6	6	0.0000	-75.0000

CONSTRAINT Positivo[i,j] :

i	j	Slack	Shadow Price
1	1	0.0000	0.0000
1	2	0.0000	0.0000
2	1	0.0000	0.0000
2	2	0.0000	0.0000
2	3	0.0000	0.0000
3	2	0.0000	0.0000
3	3	0.0000	0.0000
3	4	0.0000	0.0000
3	5	0.0000	0.0000
3	6	0.0000	0.0000
4	3	0.0000	0.0000
4	4	0.0000	0.0000
5	3	0.0000	0.0000
5	5	0.0000	0.0000
5	6	0.0000	0.0000
6	3	0.0000	0.0000
6	5	-1.0000	0.0000
6	6	0.0000	0.0000

ANEXO F : SOLUCION FINAL

Constraints:	25
Variables:	28
Integers:	28
Nonzeros:	104
Density:	15 %

SOLUTION RESULT

Optimal integer solution found

MIN costo_to = 2908928.0000

MACROS

Macro Name	Values
transpueblo	1641856.0000
costoacopio	400000.0000
transmunicipal	867072.0000

DECISION VARIABLES

VARIABLE X[j,k] :

j	k	Activity	Reduced Cost
1	1	0.0000	-160000.0000
1	2	0.0000	-80000.0000
1	3	0.0000	0.0000
2	1	0.0000	80000.0000
2	2	1.0000	160000.0000
2	3	0.0000	240000.0000
3	1	0.0000	80000.0000
3	2	0.0000	160000.0000
3	3	1.0000	240000.0000
4	1	0.0000	26752.0000
4	2	0.0000	106752.0000
4	3	0.0000	186752.0000

5	1	0.0000	80000.0000
5	2	0.0000	160000.0000
5	3	0.0000	240000.0000

VARIABLE Y[i,j] :

i	j	Activity	Reduced Cost
1	1	0.0000	-303616.0000
1	2	1.0000	0.0000
2	1	0.0000	0.0000
2	2	1.0000	0.0000
2	3	0.0000	222528.0000
3	2	0.0000	522880.0000
3	3	1.0000	0.0000
3	4	0.0000	0.0000
3	5	0.0000	1670464.0000
4	3	1.0000	0.0000
4	4	0.0000	0.0000
5	3	1.0000	0.0000
5	5	0.0000	-540000.0000

CONSTRAINTS

CONSTRAINT demservida[i] :

i	Slack	Shadow Price
1	0.0000	1136320.0000
2	0.0000	238144.0000
3	0.0000	231168.0000
4	0.0000	298496.0000
5	0.0000	604800.0000

CONSTRAINT cap_exi_serv[j] :

j	Slack	Shadow Price
1	0.0000	0.0000
2	6.0000	0.0000
3	23.0000	0.0000
4	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000

CONSTRAINT unabodega[j] :

j	Slack	Shadow Price
1	1.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000
4	1.0000	0.0000
5	1.0000	0.0000

CONSTRAINT economiaescala[j] :

j	Slack	Shadow Price
1	0.0000	-21920.0000
2	54.0000	0.0000
3	97.0000	0.0000
4	0.0000	-5120.0000
5	0.0000	0.0000

CONSTRAINT autoserv[i,j] :

i	j	Slack	Shadow Price
1	1	0.0000	-1555200.0000
2	2	0.0000	0.0000
3	3	0.0000	0.0000
4	4	0.0000	-360448.0000
5	5	0.0000	0.0000

END

ANEXO G : SOLUCION FINAL MODIFICADA

```
Constraints:        25
Variables:          30
Integers:           30
Nonzeros:           110
Density:            15 %


SOLUTION RESULT

  Optimal integer solution found

    MIN costo_to =     2368704.0000


MACROS

    Macro Name                                  Values
  ------------------------------------------------------
    transpueblo                           986752.0000
    costoacopio                           480000.0000
    transmunicipal                        901952.0000
  ------------------------------------------------------


DECISION VARIABLES

VARIABLE X[j,k] :

    j  k          Activity     Reduced Cost
  ----------------------------------------
    1  1            0.0000           0.0000
    1  2            0.0000       80000.0000
    1  3            0.0000      160000.0000
    2  1            0.0000           0.0000
    2  2            1.0000       80000.0000
    2  3            0.0000      160000.0000
    3  1            0.0000     -160000.0000
    3  2            1.0000      -80000.0000
    3  3            0.0000           0.0000
    4  1            0.0000     -160000.0000
    4  2            1.0000      -80000.0000
    4  3            0.0000           0.0000
```

5	1	0.0000	80000.0000
5	2	0.0000	160000.0000
5	3	0.0000	240000.0000

VARIABLE Y[i,j] :

i	j	Activity	Reduced Cost
1	1	0.0000	-218277.8182
1	2	0.0000	485056.0000
1	4	1.0000	0.0000
2	1	0.0000	787575.2727
2	2	1.0000	0.0000
2	3	0.0000	142528.0000
3	2	0.0000	282880.0000
3	3	1.0000	0.0000
3	4	0.0000	200320.0000
3	5	0.0000	1430464.0000
4	1	0.0000	0.0000
4	3	0.0000	-104832.0000
4	4	1.0000	0.0000
5	3	1.0000	0.0000
5	5	0.0000	-540000.0000

CONSTRAINTS

CONSTRAINT demservida[i] :

i	Slack	Shadow Price
1	0.0000	651264.0000
2	0.0000	318144.0000
3	0.0000	471168.0000
4	0.0000	403328.0000
5	0.0000	604800.0000

CONSTRAINT cap_exi_serv[j] :

j	Slack	Shadow Price
1	0.0000	0.0000
2	59.0000	0.0000
3	7.0000	0.0000
4	23.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000

CONSTRAINT unabodega[j] :

j	Slack	Shadow Price
1	1.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000
4	0.0000	0.0000
5	1.0000	0.0000

CONSTRAINT economiaescala[j] :

j	Slack	Shadow Price
1	0.0000	-5361.4545
2	1.0000	0.0000
3	53.0000	0.0000
4	37.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000

CONSTRAINT autoserv[i,j] :

i	j	Slack	Shadow Price
1	1	0.0000	-401687.2727
2	2	0.0000	-80000.0000
3	3	0.0000	-240000.0000
4	4	0.0000	-240000.0000
5	5	0.0000	0.0000

END