

MODELADO Y MANIPULACIÓN DE REDES DE SERVICIOS USANDO GRAFOS ESPACIALES EN C++*

Jonás Montilva C. y Gerardo Granados

Universidad de Los Andes
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería de Sistemas
Departamento de Computación
Grupo de Investigación en Ingeniería de Datos y Conocimiento (GIDyC)
Mérida, Venezuela

RESUMEN

Tres requerimientos de gran importancia en los sistemas de información geográfica (SIG) son el modelado, la manipulación y la visualización entidades espaciales basadas en grafos, ej., redes de servicios. Los sistemas de servicios públicos, tales como carreteras, redes de gas, redes de agua potable y redes de servicio eléctrico, son ejemplos de este tipo de entidades.

Los lenguajes orientados por objetos (Ej., C++ o Smalltalk) han probado ser particularmente útiles en el desarrollo de aplicaciones espaciales o SIG. Tales lenguajes proporcionan los constructos necesarios para representar en el computador, de un modo muy natural y directo, las entidades espaciales del dominio del problema. Estos constructos son denominados *objetos*. Los atributos y operaciones de un objeto, requeridos para su almacenamiento y manipulación en el computador, se describen mediante otro constructo denominado *clase de objetos* o, simplemente, *clase*. El modelado y manipulación de redes usando estos lenguajes es, sin embargo, un proceso complejo y costoso, que demanda del programador un elevado esfuerzo y consumo de tiempo. El programador debe definir, diseñar e implementar las clases de objetos que permiten la representación de redes. La manipulación gráfica y la visualización de estos objetos es, también, responsabilidad del programador.

En este artículo se describe una librería o colección de clases implementadas en el lenguaje C++ que le permiten a un programador desarrollar, con un mínimo esfuerzo, programas o SIG aplicados a redes. La librería se diseñó utilizando el concepto de *Grafo Espacial*. Un grafo espacial es un tipo abstracto de datos que permite la representación, manipulación, visualización y análisis espacial de grafos en el espacio ε^2 . Los nodos y ejes de un grafo espacial son objetos

* Aceptado para su presentación en el Primer Congreso Internacional de Metodos Numéricos Aplicados a la Ingeniería, Mérida, Venezuela, Marzo, 1996. pp. VA:19-26.

espaciales que tienen una geometría variable dependiente de las escalas empleadas por los usuarios del SIG. Este concepto surgió de la integración de la noción de objeto espacial en SIG con el concepto de grafo geométrico de la Teoría de Grafos.

Los aportes del trabajo se resumen en: (1) el desarrollo de un nuevo tipo abstracto de datos, que hemos denominado *grafo espacial* y (2) la creación de una librería que reduce significativamente el tiempo requerido para desarrollar en C++ aplicaciones o SIG para redes. La librería es actualmente utilizada como el elemento principal en el desarrollo de una herramienta de software para la construcción de SIG orientados por objetos.

1. INTRODUCCION

Los sistemas de información geográfica (SIG) están relacionados con el procesamiento de datos geo-referenciados; esto es, datos que emplean un sistema de referencia que determina la localización en el espacio de las entidades que ellos representan. Una característica importante de este tipo de datos es que ellos, a diferencia de los no-espaciales, son accesados en la base de datos por medio de su posición en el espacio. Estos datos representan entidades del mundo real, denominadas aquí *entidades espaciales*, las cuales se caracterizan por poseer propiedades y relaciones geométricas y topológicas. Una entidad espacial tiene propiedades espaciales, tales como su localización en un espacio determinado, su forma y su dirección. Una entidad espacial mantiene, también, relaciones espaciales con otras entidades, tales como relaciones topológicas (ej., conectividad, adyacencia e inclusión), relaciones de orden espacial y relaciones geométricas.

Un tipo muy particular de SIG es aquel en el cual las principales entidades del dominio de problema o aplicación tienen asociada una estructura de red, en la que los nodos representan otras entidades espaciales y los arcos o ejes relaciones espaciales entre estas últimas. Las redes de servicios públicos, tales como carreteras, redes de gas, redes de agua potable y redes de servicio eléctrico, son aplicaciones típicas de este tipo de SIG.

La Orientación a Objetos (OxO) - paradigma de desarrollo de software basado en la Ontología - ha probado ser particularmente útil en el desarrollo de SIG (1,2,3). Las técnicas y métodos de modelado orientado a objetos proporcionan los constructos necesarios para representar, en forma natural y directa, entidades complejas. Sin embargo, para el modelado de entidades con estructura de red, tales modelos implican un elevado consumo de tiempo y esfuerzo durante el diseño del SIG; pues dejan al diseñador la responsabilidad de definir, diseñar e implementar las clases que representan redes o grafos. Una solución a este problema es la creación de una librería de clases de objetos que proporcione a sus usuarios el conjunto de clases necesarias para utilizarlas en desarrollo de aplicaciones de redes o grafos en el espacio.

Este artículo describe un modelo de objetos que proporciona las clases necesarias para modelar y manipular espacialmente, en el computador, grafos y redes de servicios. La importancia de este modelo estriba en su capacidad semántica para representar directa y naturalmente las propiedades espaciales de aquellas entidades complejas del mundo real cuya estructura puede ser representada mediante grafos. El modelo permite capturar tanto las propiedades geométricas (localización, forma, distancia, orientación, etc.), como las propiedades topológicas (adyacencia y conectividad) de las entidades representadas. El modelo ha sido implementado usando el lenguaje C++. El resultado principal es una librería de clases de objetos transitorios en C++. La persistencia de los objetos (esto es, su habilidad para existir más allá de la ejecución del programa que lo crea) se puede lograr acoplando la librería a un sistema de gestión de bases de datos orientadas a objetos. La librería puede ser empleada directamente por un programador para construir herramientas SIG orientadas por objetos o aplicaciones de objetos no-persistentes basadas en grafos.

En la Sección 2 se discuten los requerimientos que debe satisfacer un modelo de objetos para facilitar la representación de redes de servicios. La Sección 3 describe brevemente los conceptos principales de la Orientación por Objetos. La Sección 4 presenta la noción de Objeto Espacial, elemento fundamental en el desarrollo de la noción de Grafo Espacial discutida en la Sección 5. La Sección 6 describe la librería de clases para grafos espaciales. Las conclusiones y el uso futuro de la librería se presentan en la Sección 7.

2. REQUERIMIENTOS PARA EL MODELADO DE REDES DE SERVICIOS

El desarrollo de SIG orientados por objetos descanza en la construcción de un modelo conocido como *modelo de objetos*. Este modelo es una representación de aquella porción del mundo real que es de interés al SIG, denominada *dominio de aplicación*. Una gran diversidad de dominios de aplicación se pueden modelar usando grafos. Ejemplos típicos de estas aplicaciones son los siguientes:

- los sistemas de transporte: carreteras, rutas de autobuses, redes ferroviarias, rutas aéreas, etc.
- los sistemas de servicios urbanos: redes eléctricas, redes telefónicas, gasductos y acueductos.
- las redes de computadores: redes de área local, metropolitanas y de amplia cobertura.
- el diseño de obras civiles: instalaciones eléctricas, aguas negras, aguas blancas y fundaciones.
- los sistemas hidrográficos.

En todos estos ejemplos, la entidad principal del sistema modelado es una entidad espacial cuya geometría y topología bien pueden ser representadas mediante un grafo de tipo geométrico. Un *grafo geométrico* $G(P,C)$ es definido formalmente por Busacker y Saaty (4) como una estructura geométrica en el espacio euclideo n -dimensional (ϵ^n); estructura en la cual P es un conjunto de puntos en ϵ^n y C es un conjunto de curvas continuas en ϵ^n que no se intersectan. Cada curva $c, c \in C$, conecta dos puntos $x, y \in P$.

El sistema de transporte urbano de una ciudad, por ejemplo, se puede representar mediante un conjunto de grafos geométricos; un grafo para cada tipo de transporte urbano (Ej., buses y Metro). El Metro se modelaría como un grafo geométrico $G(P,C)$ en el que los nodos de P representan las estaciones del Metro y las curvas de C los segmentos de línea de tren entre dos estaciones. Este ejemplo ilumina varios requerimientos específicos del modelado de grafos en SIG:

- 1.- Los nodos de un grafo no sólo deben representar una localización o posición en el espacio, sino también un objeto espacial compuesto (ej. una estación del metro o una parada de autobus).
- 2.- Tanto los nodos como las curvas del grafo pueden tener asociados *datos espaciales* (ej. localización, forma y tamaño de una estación de metro) y *datos no-espaciales* (ej., nombre de la estación, capacidad y servicios).
- 3.- Las curvas que conectan los nodos de un grafo representan, además de la topología del sistema modelado, la geometría que tienen estas conexiones en el sistema, en particular, sus localizaciones, formas, orientaciones y distancias.
- 4.- La representación visual del grafo utilizando mapas digitales es fundamental. Cada grafo debe dibujarse sobre un mapa topográfico que le dé localización y le permita establecer relaciones

espaciales entre los nodos y curvas del grafo con los otros objetos espaciales representados en el mapa (ej., calles, edificaciones, lugares de interés, etc.).

5.- Dependiendo de la escala del mapa utilizado, los nodos y curvas del grafo se visualizan usando formas (geometrías) diferentes. Por ejemplo, a una escala A los nodos se podrían visualizar usando puntos; mientras que a una escala B mayor los mismos nodos se presentarían usando polígonos.

Además de estos requerimientos, propios del modelado de datos basado en grafos, existe un conjunto de requerimientos generales de modelado de datos espaciales. Algunos de ellos son: (a) el acceso basado en la localización del objeto; (b) el uso de la orientación por objetos; (c) la representación de objetos compuestos; (d) la representación múltiple de las propiedades geométricas de un objeto espacial, esto es, el conocido problema de la *unidad espacial modificable* y (e) la representación explícita de propiedades y relaciones topológicas (5-7).

3.- MODELADO ORIENTADO A OBJETOS

Una propiedad importante de las técnicas de modelado OxO es su habilidad para representar directa y naturalmente las propiedades estructurales y dinámicas de las entidades del dominio de aplicación. Estas técnicas emplean constructos de modelado muy similares a la forma como normalmente el ser humano conoce el mundo que le rodea. Así, por ejemplo, cada entidad relevante del dominio de aplicación es denotada, en el modelo, por un *objeto*. La Tabla 1 presenta los constructos típicos de modelado OxO, así como la relación de denotación que estos constructos tienen con respecto a los elementos que caracterizan el mundo real.

Tabla 1: Constructos de modelado OxO y su significado

Elementos del Mundo Real	Constructos Básicos de Modelado OxO
Entidad	Objeto
Conjunto de entidades del mismo tipo	Clase
Propiedad estática de una entidad	Atributo
Asociación o interrelación entre entidades	Atributo
Acción o propiedad dinámica	Método
Evento	Mensaje

El elemento principal de un modelo de objetos es la clase. Una *clase* tiene dos funciones: (1) una función de extensión, mediante la cual la clase agrupa a un conjunto de objetos que representan entidades con propiedades similares; y (2) una función de intensión, mediante la cual se define la estructura (atributos) y comportamiento (métodos) de los objetos correspondientes a dichas entidades. Un *objeto* es una unidad de almacenamiento de datos, claramente identificada, que representa a una entidad determinada del dominio de aplicación. El objeto captura las propiedades estáticas y dinámicas de la entidad representada. Las propiedades estáticas de una entidad, al igual que sus interrelaciones con otras entidades, se modelan mediante *atributos*. Así, por ejemplo, el nombre de una ciudad, su población, su localización y su relación con la unidad administrativa a la que pertenece (Ej. distrito o estado) se representan mediante atributos. Los métodos y los mensajes permiten representar las propiedades dinámicas del dominio del problema. Los *métodos* implementan las operaciones de manipulación de los objetos en la base de datos y, normalmente, modelan las propiedades dinámicas o acciones que modifican el estado de las entidades en el dominio de aplicación. La manipulación (creación, acceso, actualización,

etc.) de los objetos en la base de datos o en memoria se realiza mediante *mensajes*. Un mensaje ocasiona la ejecución de un método sobre el objeto receptor del mensaje.

Una notación gráfica ampliamente utilizada para la elaboración de modelos de objetos es la técnica de modelado OMT (Object Modelling Technique) de Rumbaugh, et al (8). Los constructos básicos de esta técnica se definen en el Apéndice 1. Esta notación es utilizada en la secciones siguientes para describir las clases que implementan la noción de grafo espacial.

4. LA NOCIÓN DE OBJETO ESPACIAL

Los dominios de aplicación de los SIG están constituidos esencialmente por entidades cuyas propiedades guardan relación con el espacio. La localización de una entidad, su forma, su dirección, sus medidas, su relación con entidades vecinas son algunas de estas propiedades espaciales. Este tipo de entidades se denominan *entidades espaciales*.

La noción de *objeto espacial* es particularmente útil para representar entidades espaciales en un SIG OxO. El objeto espacial es un constructo de modelado que captura explícitamente las propiedades geométricas y topológicas de una entidad en un espacio determinado. Las propiedades geométricas están relacionadas con la localización de la entidad en un sistema de coordenadas dado, con su forma o geometría, su dirección y sus medidas geométricas (área, perímetro, centro, etc.); mientras que las propiedades topológicas determinan las relaciones de conexión, adyacencia e inclusión que una entidad mantiene con respecto a otras en un espacio determinado.

Una diferencia importante entre las propiedades geométricas y topológicas es que las primeras varían si se modifica el sistema de coordenadas utilizado; mientras que las segundas se mantienen invariantes ante este tipo de cambio. Esta diferencia se puede ilustrar mejor con ejemplo. Considere un mapa digital que muestra en pantalla, a una escala 1:100.000, un estado de un país y sus diferentes ciudades. A esta escala, cada ciudad se modelaría en el mapa mediante un círculo de radio r que indica la posición de la ciudad con respecto al sistema de coordenadas empleado. Si modificamos la escala del mapa, digamos que se aumenta a 1:10.000, la representación geométrica de las ciudades también variaría. Cada ciudad se representaría, en esta última escala, por un polígono que mostraría los límites urbanos de la ciudad. Nótese que las relaciones topológicas de cada ciudad con respecto a otras se mantienen invariantes ante los cambios de escala.

La unidad geométrica empleada para representar las entidades espaciales en un mapa es, por consiguiente, modificable; ella depende de la escala empleada para dibujar los objetos en el mapa. Esta situación recibe el nombre de *el problema de la unidad espacial modificable* (5). Una solución apropiada a este problema es dada por el modelo de datos espaciales propuesto por S.A. Roberts, et al (1), cuyo diagrama OMT se muestra en la Fig. 1. En este modelo cada objeto espacial tiene asociado un conjunto de *representaciones espaciales*; una para cada escala utilizada. Una representación espacial es otro objeto que captura la geometría de la entidad representada a una escala determinada. La geometría del objeto es definida por una colección de objetos gráficos de las clases punto, línea o polígono.

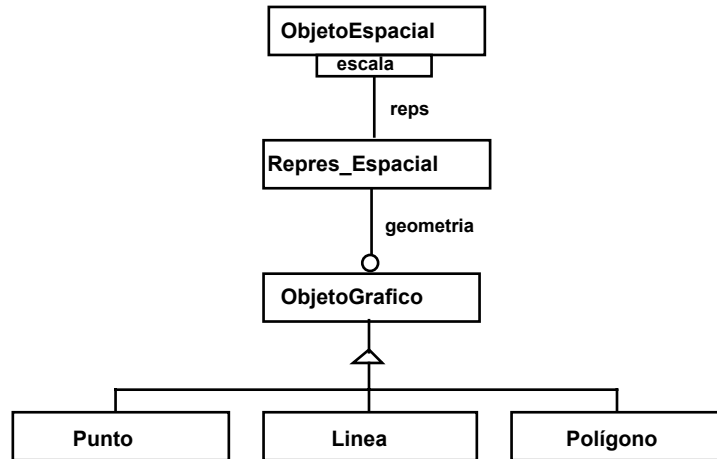


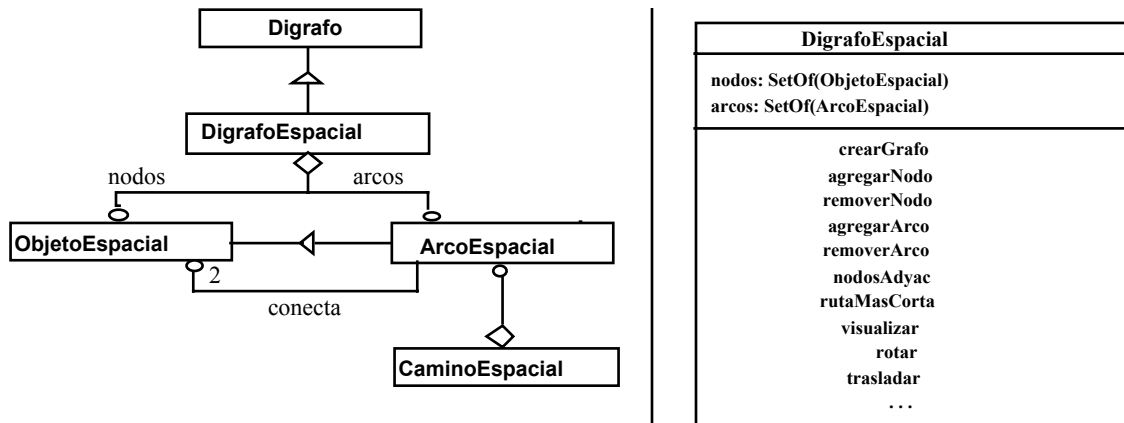
Figura 1: Clases para representar entidades en el espacio 2D

5.- LA NOCIÓN DE GRAFO ESPACIAL

Una entidad espacial está normalmente compuesta por un conjunto de entidades espaciales de menor tamaño. Muchas de estas entidades componentes mantienen entre sí relaciones cuya representación en el espacio puede ser de interés particular para un SIG. Las redes de servicios son representativas de este tipo de entidades espaciales, en las cuales tanto los nodos como los arcos o ejes que conectan los nodos tienen, además de las propiedades topológicas inherentes, propiedades geométricas, tales como localización, forma y dirección. En un acueducto urbano, por ejemplo, no sólo es de interés la localización de las tomas, plantas y estanques, sino también la ubicación exacta y la dirección que tienen las líneas de aducción. Este tipo de entidades se representan formalmente mediante grafos geométricos.

Partiendo de las nociones de grafo geométrico y objeto espacial, discutidas en las Secciones 2 y 4 respectivamente, se desarrolló en (6) el concepto de *grafo espacial*, el cual permite representar en una base de datos OxD entidades con estructura de grafo. Un *grafo espacial* es un grafo finito cuyos nodos son objetos espaciales interconectados por relaciones espaciales. Una *relación espacial* es, también, un objeto espacial con una geometría de tipo lineal.

Dependiendo del tipo de relación espacial, los grafos espaciales se dividen en *digrafos espaciales* y *grafos espaciales no-dirigidos*. La Fig. 2a presenta el modelo de objetos OMT de un digrafo espacial. Un digrafo espacial es un objeto compuesto de una colección de objetos espaciales, los cuales se interconectan mediante arcos espaciales. Un *arco espacial* es definido como un objeto espacial que conecta, en una dirección determinada, la geometría de dos objetos espaciales. Esta conexión tiene una representación espacial del tipo lineal, la cual es heredada de su condición de objeto espacial.



a) Clases para digrafos espaciales

b) Atributos y métodos de los digrafos espaciales

Figura 2: Clases para representar grafos en el espacio ϵ^2

Los métodos u operaciones soportadas por la clase *DigrafoEspacial* se ilustran en la Fig. 2b. Una operación de uso común en grafos es la determinación de rutas o caminos óptimos o alternativos entre dos nodos dados. Para soportar este tipo de operación, se incluye en el esquema de grafos espaciales la clase *CaminoEspacial*, la cual consta de una secuencia de arcos espaciales que parte de un nodo inicial y culmina en un nodo final.

6.- LA LIBRERÍA DE CLASES PARA GRAFOS ESPACIALES

La librería de clases para grafos espaciales está organizada en tres niveles: básico, grafos y grafos espaciales (ver Tabla 2). El primer nivel incluye una colección de clases básicas requeridas por los niveles superiores. El segundo de ellos contiene las clases necesarias para representar y manipular grafos, mientras que el tercero agrega la componente espacial. Las clases se especializan, de acuerdo al tipo de conexión entre nodos, en *digrafo* o *grafo no-dirigido*.

Para la determinación de caminos óptimos se empleó el conocido algoritmo de Floyd, el cual es particularmente apropiado para obtener varios caminos óptimos, entre diferentes pares de nodos sobre un mismo grafo (9).

Las clases de la librería podrán ser empleadas por los usuarios en sus programas de aplicación en C++, bien, creando objetos que sean instancias de estas clases, o construyendo sus propias clases mediante la especialización de las provistas por la librería. Existe también una tercera posibilidad de utilización, basada en la mezcla de las 2 primeras. Por ejemplo, un usuario que esté modelando rutas aéreas, podrá utilizar una instancia del grafo espacial dirigido (en ocasiones, los pasajes de ida tienen diferente precio al de regreso), pero en vez de usar directamente la clase *CaminoEspacial*, implementará una propia llamada, por ejemplo, *CanalAéreo*, la cual tendrá un método adicional a los proporcionados por *CaminoEspacial* llamado, por ejemplo, *TiempoEntreTransbordos*. Se observa, de este modo, como la librería puede ser fácilmente reutilizada, lo cual es una característica fundamental de la OxO.

La implementación de la librería se orientó a proporcionar al programador un ambiente de trabajo estándar, de forma que el vínculo que la asocia al sistema operativo Unix sea mínimo, y no esté atado a una versión del mismo o a la de un fabricante determinado. Por ello se empleó el lenguaje C++ y la librería Xlib, interfaz al lenguaje C del protocolo X. Se obtuvo así una gran *portabilidad*, ya que las aplicaciones que usan esta librería sólo imponen como requisito, trabajar

en un ambiente Unix, independientemente de la plataforma de *hardware* que se emplee. La implementación de la librería se describe en detalle en (9).

Tabla 2: Librería de clases para grafos espaciales

Librería de Clases en C++ para Grafos Espaciales		
Nivel Espacial	<i>Clases Espaciales</i>	<i>Clases Grafo Espacial</i>
	SpObject SpRepresentation GraphicalObject SpPolygon SpChain SpNode	SpDigraph SpArc SpPath SpSimplePath SpUndirGraph SpEdge SpChain SpSimple cahn
Nivel de Grafos	<i>Clases Grafo Dirigido</i>	<i>Clases Grafo No Dirigido</i>
	Digraph Arcs Path SimplePath	UndirGraph Edge Chain SimpleChain
Nivel Básico	Lista, Set, IndexArc, Relationship	

La librería ha sido probada en los compiladores de C++, versión 3.0.1 de SUN, C++ versión 3.2 de Silicon Graphics, y en la versión GNU C++ 2.7. Las dos primeras operan en ambientes UNIX de estaciones de trabajo, mientras que la última opera en microcomputadores PC.

7. CONCLUSIONES

La librería de clases presentada en este artículo es una importante herramienta de apoyo al desarrollo de SIG-OxO. Su utilidad práctica radica en la reducción del tiempo de desarrollo de aplicaciones o SIG basados en grafos; pues, proporciona una colección de clases reutilizables que reducen significativamente el tiempo de programación requerido para la representación, manipulación y visualización de grafos en el espacio 2D. Una de las características más relevantes de la librería es su *portabilidad*, lograda a través del lenguaje C++ y el sistema de ventanas XWindow, los cuales garantizan que la librería pueda ser empleada en máquinas tan variadas como un computador personal ó una estación de trabajo.

La librería se basó en la noción de grafo espacial. Este concepto emergió de la integración del concepto de objeto espacial de Roberts, et al (1) con la definición de grafo geométrico de Busacker y Saaty (4). Esta integración se logró mediante la aplicación de un método de integración de tecnologías de *software* descrito en Montilva (10). Visto como un tipo abstracto de datos, el grafo espacial tiene la propiedad de proporcionar una colección amplia de operadores para representar, manipular y visualizar grafos planares en un computador.

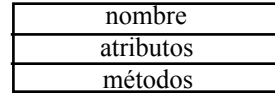
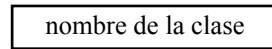
La principal diferencia entre la librería aquí descrita y la amplia colección de librerías para grafos existentes radica en la habilidad que tienen los grafos espaciales para representar en 2D la geometría de sus nodos y arcos (o ejes), así como su capacidad para realizar análisis espacial sobre ellos.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Roberts, S.A., Gahegan, M.N., Hogg, J., and Hoyle, B. Application of object-oriented databases to geographic information systems. *Information and Software Technology*, Vol.33, No.1, 1991, pp.38-46.
- (2) Egenhofer, M. and Frank, A. *Object-Oriented Modeling: A Powerful Tool for GIS*. Technical Report. Department of Surveying Engineering. University of Maine, USA, 1988.
- (3) van Oosterom, P. and van des Bos, J. An Object-Oriented Approach to the Design of Geographical Information Systems. In Buchmann, A. et al (Eds.), *Design and Implementation of Large Spatial Databases*. Springer-Verlag, 1990, pp. 325-344.
- (4) Busacker, R.G. and Saaty, T.L. *Finite Graphs and Networks: An Introduction with Applications*. McGraw-Hill, 1965.
- (5) Bosque Sendra, J. *Sistemas de Información Geográfica*. Ediciones RIALP, Madrid, 1992.
- (6) Montilva, J.A. *An integration method applied to the design of a data/knowledge model for multimedia and spatial applications*. Ph.D. Thesis. University of Leeds, School of Computer Studies, Leeds, UK, January, 1993.
- (7) Frank, A.U. Properties of Geographic Data: Requirements for Spatial Access Methods. In Gunther, O. and Schek, H.-J. (Eds), *Advances in Spatial Databases*, Springer-Verlag, 1991, pp.225-234.
- (8) Rumbaugh, J. et al. *Object-Oriented Modeling and Design*. Prentice-Hall, NY. 1991.
- (9) Granados, G. *Especificación, diseño e implementación de una librería de clases para grafos espaciales*. Tesis de Grado. Universidad de Los Andes. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Sistemas, Departamento de Computación. Mérida, 1995.
- (10) Montilva, J. A. A methodological framework for the integration of software tools in intelligent information systems. *Proc. of the 5th Int. Symp. on Systems Research, Informatics and Cybernetics*. Baden-Baden, Alemania, Agosto, 1995.

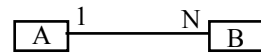
APENDICE 1: Constructos Basicos de la técnica de modelado OMT

CLASE



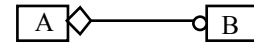
Conjunto de objetos con igual estructura y comportamiento

ASOCIACION



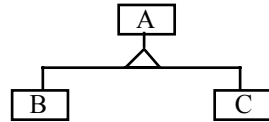
Los objetos de la clase A están asociados a los objetos de B según la cardinalidad indicada (1:1, 1:N, N:1, N:M)

COMPOSICION



Cada objeto de A está compuesto por 0, 1 ó más objetos de B

ESPECIALIZACION



La clase A se divide en subclases B y C. Las clases B y C heredan los atributos y métodos de A.

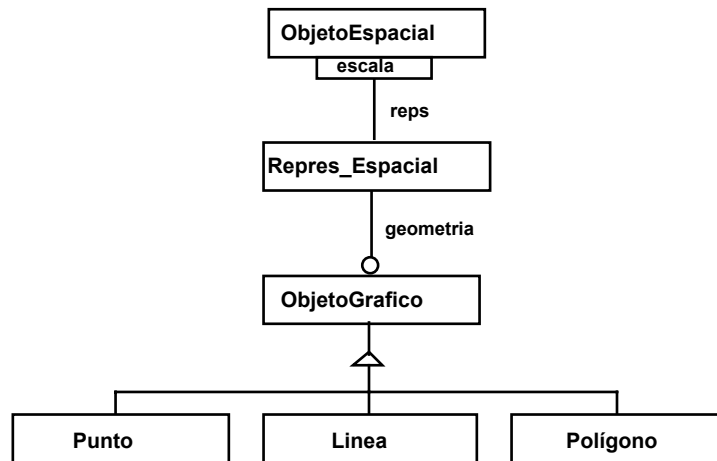
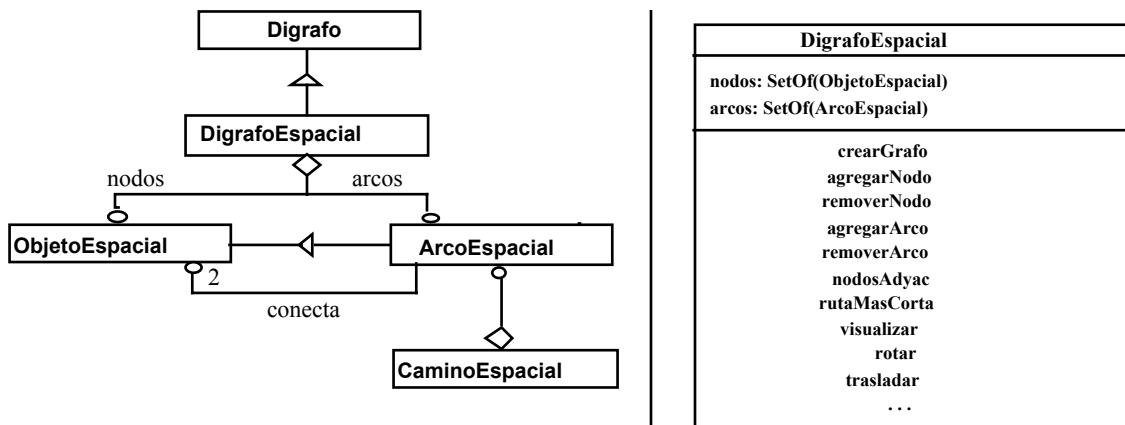
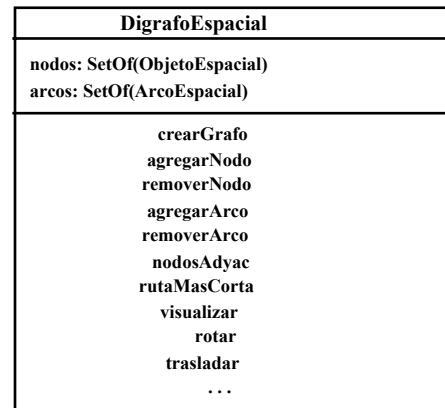


Figura 1: Clases para representar entidades en el espacio 2D



a) Clases para digrafos espaciales



b) Atributos y métodos de los digrafos espaciales:

Figura 2: Clases para representar grafos en el espacio ε^2