

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

**Aplicación de los SIG para Modelamiento de datos en 3D: hacia
una integración completa en 5D**

Yull Fernando Salcedo Bohórquez

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de Maestría
en Sistemas de Información Geográfica

Bogotá, junio de 2012

**Universidad San Francisco de Quito
Colegio de Postgrados**

HOJA DE APROBACION DE TESIS

**Aplicación de los SIG para Modelamiento de datos en 3D: hacia
una integración completa en 5D**

Yull Fernando Salcedo Bohórquez

Richard Resl, MSc.
Director de Tesis
Director del Programa de Maestría en
Sistemas de Información Geográfica

Pablo Cabrera, MSc.
Miembro del Comité de Tesis

Stella de la Torre, Ph.D.,
Decana del Colegio de
Ciencias Biológicas y Ambientales

Victor Viteri Breedy, Ph.D.,
Decano del Colegio de Posgrados

Quito, junio de 2012

©Derechos de autor

Yull Fernando Salcedo Bohórquez

2012

Dedicatoria

A mis padres Isidro Antonio
Y Floralba, mi bella esposa
Luz Emilse, y mis amados
hijos Yael Santiago y
Samuel David

...y si una teoría denominada principio
holográfico demuestra ser correcta,
nosotros y nuestro mundo cuatro-
dimensional podríamos ser sombras de la
frontera de un espacio-tiempo mayor, de
cinco dimensiones...
El gran diseño
Stephen Hawking

Agradecimientos

Quiero dar mis agradecimientos a mi familia por el soporte y apoyo que siempre me han brindado. Especialmente a mi esposa quien ha tenido la paciencia de soportar mi ausencia durante este tiempo de estudio y a mis hijos con quienes he perdido valiosas horas de juego y que espero poder recuperar; pues infortunadamente el tiempo de estudio se lo tenemos que robar siempre a la familia.

Palabras calve

Representación geométrica, modelo/estructura 5D, quinta dimensión, tGAP, poliedro, DHE, nivel de detalle, espacio3D+tiempo+escala.

Resumen

Tradicionalmente los Sistemas de Información Geográfica - SIG se han modelado en espacios multidimensionales 2D, 3D y se ha incluido el tiempo como la cuarta dimensión; además, existe una nueva propuesta donde se plantea la escala como la quinta dimensión y se busca poder manejar en una base de datos geográfica estas cinco dimensiones completamente integradas. El considerar la escala como una dimensión extra de la información geográfica y completamente integrada con las otras dimensiones es una propuesta que busca mejorar y fortalecer la administración e integración de los datos espaciales en las Infraestructuras de Información Geográfica - IIG.

Abstract

Traditionally, Geographic Information Systems GIS have been modeled in 2D, 3D multidimensional spaces and time has been included as the fourth dimension. There is a new approach also which raises the scale as the fifth dimension and seeks to manage these five dimensions fully integrated in a geographical database. Considering scale as an extra dimension of geographic information and fully integrated with the other dimensions is a proposal that seeks to strengthen management and integration of spatial data in Geographic Information Infrastructures - GI.

Tabla de contenido

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Motivación	1
1.2	Pregunta de investigación y enfoque	2
1.3	Objetivo e Hipótesis	3
1.4	Contribución de la tesis	3
1.5	Organización de la tesis	4
2	METODOLOGIA DE INVESTIGACIÓN PARA EL MODELAMIENTO DE DATOS EN 5D	5
3	DATOS GEOMETRICOS, TIEMPO Y ESCALA	7
3.1	Modelo de datos Geométrico	8
3.2	Tiempo	16
3.3	Escala	18
4	REQUERIMIENTOS DEL MODELO 5D	21
4.1	Propiedades del modelo de geo-datos	21
4.1.1	Cierre de las operaciones geométricas	22
4.1.2	Estructura de datos eficiente	22
4.1.3	Robustez de los cálculos geométricos.....	23
4.1.4	Independencia de la dimensión	23
4.2	Modelamiento nD	23
4.3	Modelamiento espacio-temporal	24
4.4	Modelamiento multi-escala.....	27
4.5	Primitivas 3D	33
4.5.1	DHE	34
4.5.2	Otras primitivas 3D	35
5	PROPUESTA DE MODELOS 3D	37
5.1	Consideraciones sobre los modelos.....	37
5.2	Modelo 5D.....	39
5.2.1	Conceptos básicos	40
5.2.2	Componentes de forma de los elementos	41
5.2.3	Sistema de coordenadas.....	43
5.2.4	Modelo/estructura 5D	43

6 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	47
BIBLIOGRAFIA	50
Anexos	52
Diagramas ISO 19107 – Información geográfica – Esquema espacial	52

Lista de figuras

Figura 1: Flujo de trabajo de la metodología de investigación.....	6
Figura 2: Elementos primitivos en SIG	10
Figura 3: Punto, línea y polígono con coordenada z opcional.....	10
Figura 4: Representación de una superficie - TIN.....	12
Figura 5: a) poliedro b) poliedro con un cilindro c) tetraedro	12
Figura 6: Formas geométricas.....	13
Figura 7: Tabla de atributos.....	14
Figura 8: Comportamiento de los elementos.....	14
Figura 9: Tipos de relaciones.	15
Figura 10: Modelos de terreno y de redes.....	16
Figura 11: El tiempo como tercera dimensión: división de predios (izquierda) y objetos en movimiento (derecha).	17
Figura 12: a) 2D + escala, b) Piramidal.....	20
Figura 13: Propiedades de un Modelo de Datos Espacial.....	22
Figura 14: BIM modelo 5D.....	24
Figura 15: Cubo espacio-escala (ssc) representado en 3D. a) ssc para la estructura tGAP clásica. b) ssc para la estructura tGAP suave.....	31
Figura 16: Los 4 fragmentos de mapa y la estructura tGAP correspondiente.	32
Figura 17: La estructura DHE modela subdivisiones para representar los límites de cada poliedro en forma separada con un grafo (líneas negras), y dos poliedros adyacentes se enlazan por el grafo dual (líneas punteadas). Ambas gráficas están inter-conectadas.....	34
Figura 18: a) Poliedro b) Poliedro con un cilindro c) Tetraedro.	36
Figura 19: Matriz de modelos.....	38
Figura 20: Diagrama principal Modelo/estructura 5D.	44
Figura 21: Modelo/estructura 5D integrado	45
Figura 22: Primitivas geométricas.	52
Figura 23: Clases de segmentos de curva.	53
Figura 24: Paquetes geométrico y topológico.	54

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

La motivación de este proyecto de investigación radica en la importancia que esta tomando en el mundo el concepto de compartir información especialmente a través de las Infraestructuras de datos Espaciales - IDEs o Infraestructuras de Información Geográfica - IIG donde confluyen datos de diferentes fuentes y características que para ser utilizadas de una forma eficiente deben estar bajo un conjunto de normas y estándares (incluido el semántico). El proponer un modelo genérico de Información Geográfica en 5D impactará positivamente en el manejo de la información tanto a nivel de las distintas organizaciones como de las IIGs; de igual forma impactará en el desarrollo de herramientas de software SIG así como la forma en que se aborde el diseño y conceptualización de una solución SIG.

El tema es relevante para toda organización que participe y/o coordine las infraestructuras de datos debido a que conducirá como se ha dicho a un mejor manejo de la información. En el caso colombiano algunas de las entidades para quien son relevantes este tipo de investigación son las entidades que manejan los catastros prediales como el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC y la Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital – UAECD (con un modelo espacio3D+tiempo) y el Instituto Colombiano de Geología y Minería - Ingeominas (con un modelo espacio2D+tiempo) que maneja el catastro minero; sistemas que

son de vital importancia para el mantenimiento del inventario predial y de riqueza minera del país.

1.2 Pregunta de investigación y enfoque

Las preguntas objeto de investigación son:

1. ¿Crear un modelo/estructura de datos 5D es útil?
2. ¿Se puede crear un modelo/estructura de datos 5D con la tecnología actual?
3. ¿Puede un modelo/estructura de datos 5D soportar cualquier aplicación SIG?

La investigación busca generar conocimiento a través del estudio encaminado hacia una integración completa de los conceptos de escala y tiempo con los modelos tradiciones 2D/3D, de tal forma que permita reemplazar el tratamiento tradicional de la escala y el tiempo por un nuevo concepto totalmente integrado de los conceptos espacio3D+escala+tiempo representados sobre un único modelo/estructura 5D que los integre y que se pueda implementar sobre un geo-DBMS.

A pesar de que el alcance del presente trabajo será un modelo conceptual 5D se trabajara sobre los modelos planteados para el primer y segundo ciclo; se espera que la experiencia adquirida sea aplicable a la generación de los modelos 5D.

1.3 Objetivo e Hipótesis

El objetivo es obtener un modelo conceptual de datos 5D integrado que sirva como soporte para la obtención de los modelos 3D y 4D. La solución estará basada en la hipótesis de que es posible la creación de un modelo espacio3D-tiempo-escala continuo sin superposiciones ni huecos; el modelo debe cumplir con los requerimientos:

- El tiempo es una dimensión en el espacio geográfico.
- La escala como una dimensión en el espacio geográfico.
- Las dimensiones temáticas son los atributos del modelo geográfico 5D.
- Un modelo/estructura integrado del espacio geográfico 5D espacio3D-tiempo-escala.

Hipótesis: Es posible la creación de un modelo espacio3D-tiempo-escala continuo sin superposiciones ni huecos.

1.4 Contribución de la tesis

En esta tesis se muestra las características generales de los elementos que constituyen el espacio geográfico cinco-dimensional como son las dimensiones geométricas o espaciales 0D a 3D, el tiempo como cuarta dimensión y la escala como la quinta dimensión. También se registran las características de un modelo de geo-datos y los requerimientos que tienen las diferentes dimensiones especialmente el tiempo y escala.

1.5 Organización de la tesis

Esta tesis esta organizada así:

Capítulo 2: Este capítulo presenta los pasos propuestos para la obtención de un modelo de datos 5D.

Capítulo 3: Este capítulo presenta en forma concisa los elementos de un espacio geográfico cinco-dimensional como son las dimensiones geométricas o espaciales propiamente dichas 0D a 3D, la dimensión del tiempo y la dimensión de la escala.

Capítulo 4: Este capítulo describe las características de un modelo espacial, marca el límite entre sistemas multidimensionales que consideran las dimensiones temáticas y los que consideran las dimensiones geográficas (considerando al tiempo y escala como dimensiones geográficas) y finalmente presenta los requerimientos de los modelos espacio-temporales y multi-escala.

Capítulo 5: Este capítulo muestra el modelo lógico 5D con las propuestas de alternativas de clases que permita la generación de modelos de dimensiones inferiores.

Capítulo 6: este capítulo muestra algunas conclusiones resultado del trabajo de investigación y presenta algunas recomendaciones para futuras investigaciones o trabajos futuros.

2 METODOLOGIA DE INVESTIGACIÓN PARA EL MODELAMIENTO DE DATOS EN 5D

La propuesta de creación de un modelo o estructura de datos cinco-dimensional que permita trabajar cualquier aplicación SIG es una propuesta completamente nueva y que requiere de un proceso de un esfuerzo de muchos investigadores y del desarrollo de nuevos conceptos; para la materialización probablemente no se adecuen las herramientas de software SIG y de bases de datos existentes lo que conllevará a la creación de nuevas herramientas de software.

Para lograr llegar a un modelo 5D se propone ¹ estudiar los principios establecidos en el modelamiento multidimensional para los modelos de datos 2D/3D, espacio-temporal y multi-escala y gradualmente extender los resultados con dimensiones extra en tres iteraciones (A, B, y C) como se muestra en la Figura 1. Esto va a permitir tener como resultado tres modelos 3D alternativos en la primera iteración (espacio3D, espacio2D+tiempo y espacio2D+escala) y tres modelos 4D en la segunda iteración (espacio3D+tiempo, espacio3D+escala y espacio2D+tiempo+escala) y finalmente un modelo de datos 5D en el que también se soportan objetos con menos dimensiones.

¹ Van Oosterom, Peter, Stoter Jantien. 5D Data Modelling: Full Integration of 2D/3D Space, Time and Scale Dimensions. GIScience 2010, LNCS 6292, pág. 310-324. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010.

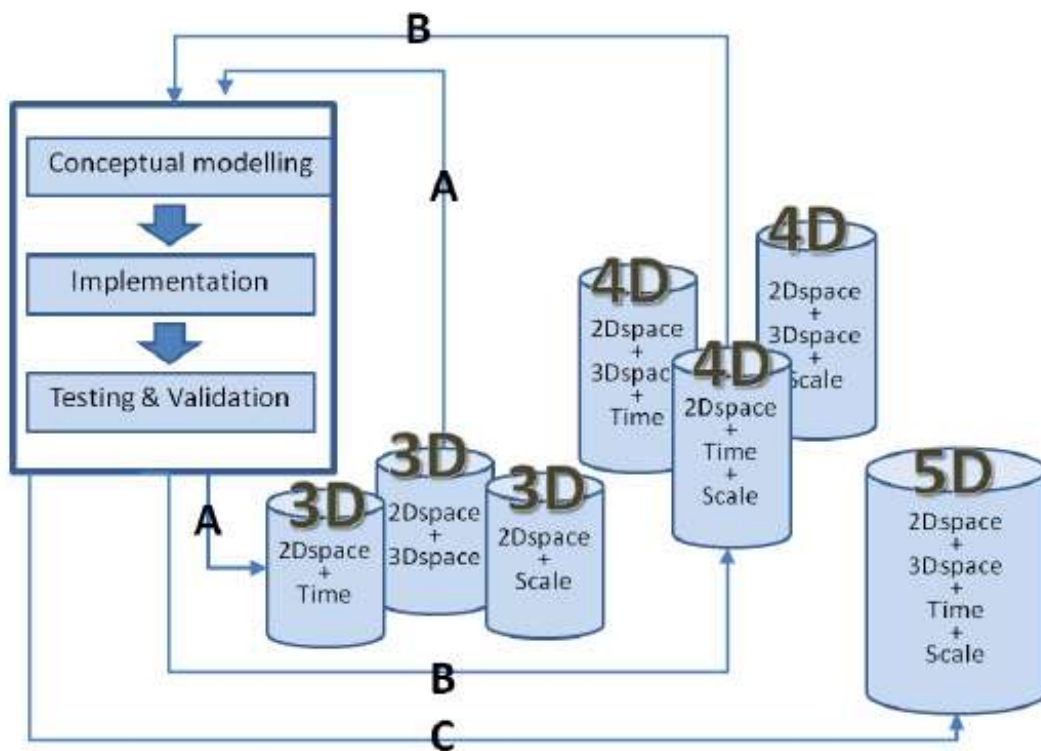


Figura 1: Flujo de trabajo de la metodología de investigación.

Para el alcance de esa tesis se trabajó en el modelo conceptual de la tercera iteración (iteración C) por considerar que la implementación, pruebas y validación de las dos primeras iteraciones requieren de un tiempo que sobrepasa al asignado para esta investigación. Se buscó que los conceptos reunidos en esta investigación den una idea muy precisa de la dimensión del trabajo requerido para obtener el modelo 5D.

3 DATOS GEOMETRICOS, TIEMPO Y ESCALA

La representación del mundo geográfico es extremadamente compleja, revelando detalles a medida que se observa desde más de cerca, hasta casi el infinito²; el poder representar esta complejidad del mundo real es lo que lleva a plantear modelos o representaciones de esta realidad o de parte de ella haciendo necesario escoger entre las diferentes representaciones comúnmente aceptadas en el ámbito de los Sistemas de Información Geográfica - SIG como son los modelos vectoriales topológicos con sus tres dimensiones o los modelos raster e involucrando en algunos casos el tiempo cuando se quiere representar fenómenos en un marco de tiempo dado y por ultimo la escala se presenta como una característica intrínseca al modelo y que define o restringe el nivel de detalle con que representamos los objetos.

La propuesta de definir un modelo de datos en cinco dimensiones donde se tiene en cuenta las tres dimensiones para la representación geométrica y la cuarta dimensión para el tiempo y se identifica la escala como una característica dimensional³ es un esfuerzo que busca poder llevar a un solo modelo de datos la representación de la realidad geográfica a través de una definición formal de datos geográficos en un continuum conceptual 5D⁴.

² Longley, Paul A., Michael F. Goodchild, Davis J. Maguire, Davis W. Rhind. Geographic Information Systems and Science. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2001. Pág. 59

³ Van Oosterom, Peter, Stoter Jantien. 5D Data Modelling: Full Integration of 2D/3D Space, Time and Scale Dimensions. GIScience 2010, LNCS 6292, pág. 310-324. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010. Pág 311.

⁴ ídem.

La propuesta de este modelo cinco-dimensional busca establecer un solo modelo de datos que se pueda implementar en un Sistema Manejador de Bases de Datos – SMDB y que sirva como base para el modelamiento de diferentes aplicaciones en los SIG a través y no limitado a las Infraestructuras de Datos Especiales - IDEs. Después de muchas iniciativas aisladas, nuestra sociedad está dirigiéndose hacia una Infraestructura de Geo Información GII⁵ sostenible en el que la geo-información es compartida y reutilizada por muchos y muy diferentes usuarios y aplicaciones a través de enlaces a máquinas con grandes cantidades de datos geográficos e información distribuidos⁶ y de aquí la importancia de establecer “un modelo” que permita manejar las diferentes dimensiones de la interoperabilidad de los datos en las diferentes aplicaciones. A continuación se hace una descripción de las cinco dimensiones.

3.1 Modelo de datos Geométrico

En el modelo geométrico se manejan las dimensiones (0D a 3D) espaciales a través de las cuales se representan los objetos geográficos; el termino dimensión (del latín *dimensiō* abstracto de *dimetiri* 'medir') es un número relacionado con las propiedades métricas o topológicas de un objeto matemático. Existen diversas medidas o conceptualizaciones de dimensión: dimensión de un espacio vectorial, dimensión topológica, dimensión fractal, etc. Ocasionalmente se usa el término "dimensión" para el valor de una medida lineal o longitud recta de una figura

⁵ Geo Information Infrastructure –GII por sus siglas en ingles.

⁶ Van Oosterom, Peter, Stoter Jantien. 5D Data Modelling: Full Integration of 2D/3D Space, Time and Scale Dimensions. GIScience 2010, LNCS 6292, pág. 310-324. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010.

geométrica u objeto físico; el mundo físico en el que vivimos parece de cuatro dimensiones perceptibles. Tradicionalmente, se separa en tres dimensiones espaciales y una dimensión temporal (y en la mayoría de los casos es razonable y práctico). Podemos movernos hacia arriba o hacia abajo, hacia el norte o sur, este u oeste, y los movimientos en cualquier dirección puede expresarse en términos de estos tres movimientos. Un movimiento hacia abajo es equivalente a un movimiento hacia arriba de forma negativa. Un movimiento norte-oeste es simplemente una combinación de un movimiento hacia el norte y de un movimiento hacia el oeste. El tiempo, a menudo, es la cuarta dimensión; es diferente de las tres dimensiones espaciales ya que sólo hay uno, y el movimiento parece posible sólo en una dirección⁷.

En los SIG el modelo de datos vectorial maneja la representación de los datos geográficos mediante elementos Primitivos como son los puntos, líneas, áreas y volúmenes⁸; para describir la geometría de estas primitivas se necesita diferentes dimensiones⁹. Un punto tiene una dimensión de cero y es básicamente una posición en el espacio, sin largo, ancho ni profundidad o altura. Una línea puede describirse como un camino entre mínimo dos puntos en el espacio y además tiene una extensión en el espacio. Un área necesita dos dimensiones para describir su extensión en el espacio, como son el largo y el ancho. Finalmente, un

⁷ <http://es.wikipedia.org/wiki/Dimensi%C3%B3n>.

⁸ Ekberg, Fredrik. An approach for representing complex 3D objects in GIS applied to 3D properties. University of Gävle. 2007. Pág. 16.

⁹ Foley, J. D., van Dam, A., Feiner, S. K., and Hughes, J. F., 1990. Computer Graphics: Principles and practice, 2nd ed. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. USA, pág 175.

volumen tiene largo, ancho y profundidad lo que permite describirlo con tres dimensiones. La Figura 2 ilustra la geometría de estos elementos primitivos¹⁰.

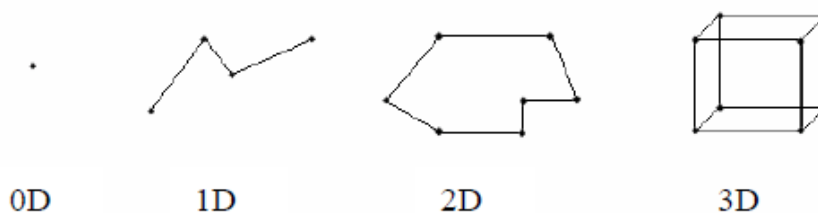


Figura 2: Elementos primitivos en SIG

La geometría con que se representan las capas tradicionales en los SIG son punto (0-dimensional), línea (1-dimensional) y polígono (2-dimensional); estos elementos se representan normalmente con un par de coordenadas x,y y si se cuenta con un valor opcional de altura z, se pueden representar en una aplicación que permita desplegarlos tanto en el espacio 2D como en el espacio 3D como se muestra en la Figura 3.

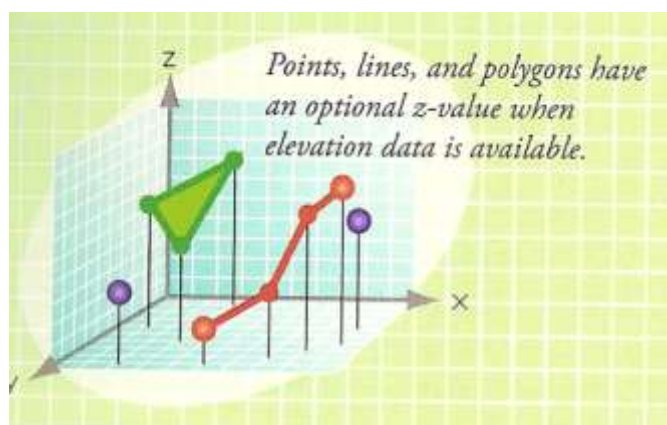


Figura 3: Punto, línea y polígono con coordenada z opcional¹¹.

¹⁰ Ekberg, Fredrik. An approach for representing complex 3D objects in GIS applied to 3D properties. University of Gävle. 2007. Pág. 16.

¹¹ Zeiler, Michael. Modeling Our World The ESRI Guide to Geodatabase Concepts. Segunda edición. ESRI Press. Redlands California. 2010. Pág. 29.

Adicionalmente los volúmenes (3-dimensional) o elementos 3D se representan con coordenadas x,y,z y se representan a través de sólidos; que tienen múltiples valores de z para un par de coordenadas x,y como en el caso de los poliedros. Elementos que se pueden describir por sus coordenadas x,y,z son comúnmente referidos como “verdaderos” elementos 3D y se almacenan como elementos complejos en una base de datos geográfica¹². Entre los objetos complejos que se pueden catalogar como verdaderos elementos 3D están los TIN¹³ que se conocen como objetos 2.5D debido a su característica de almacenar un solo valor de z para cada par de coordenadas x,y ; pero como pueden ser descritos por las coordenadas x,y,z de los vértices de sus triángulos se puede decir que son elementos 3D verdaderos aunque no encierran un volumen Figura 4. Otros elementos 3D verdaderos son los sólidos; un sólido consiste de un conjunto de caras poligonales que crean un volumen cerrado la Figura 5 muestra algunos ejemplos de estos elementos sólidos.

¹² Ekberg, Fredrik. An approach for representing complex 3D objects in GIS applied to 3D properties. University of Gävle. 2007. Pág. 18.

¹³ Triangulated Irregular Network - TIN

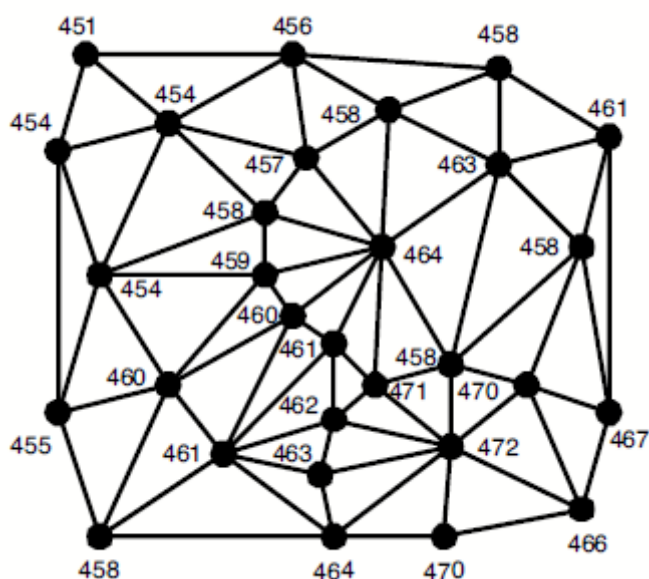


Figura 4: Representación de una superficie - TIN¹⁴

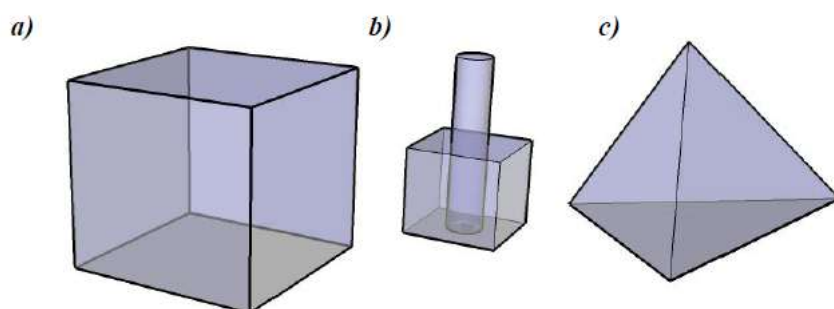


Figura 5: a) poliedro b) poliedro con un cilindro c) tetraedro¹⁵

Los elementos geométricos representados en una base de datos tienen cinco cualidades principales¹⁶ que nos permiten modelar diferentes aplicaciones y son

¹⁴ Zeiler, Michael. Modeling our World The ESRI Guide to Geodatabase Design. ESRI Press. Redlands California. 1999. Pág. 163.

¹⁵ Ekberg, Fredrik. An approach for representing complex 3D objects in GIS applied to 3D properties. University of Gävle. 2007. Pág. 19.

¹⁶ Zeiler, Michael. Modeling Our World The ESRI Guide to Geodatabase Concepts. Segunda edición. ESRI Press. Redlands California. 2010. Pág. 54.

componentes que se almacenan en una base de datos orientada a objetos como es el caso de la Geodatabase¹⁷ de Esri. Las cualidades son¹⁸:

Forma geométrica: El elemento se almacena en una tabla en la base de datos con un campo especial donde se almacena su geometría. En la caso de la Geodatabase permite almacenar cinco tipos de elementos por *clase entidad*¹⁹. Los tipos son punto, multipunto, línea, polígono y el multiparche que permite representar objetos tridimensionales Figura 6.

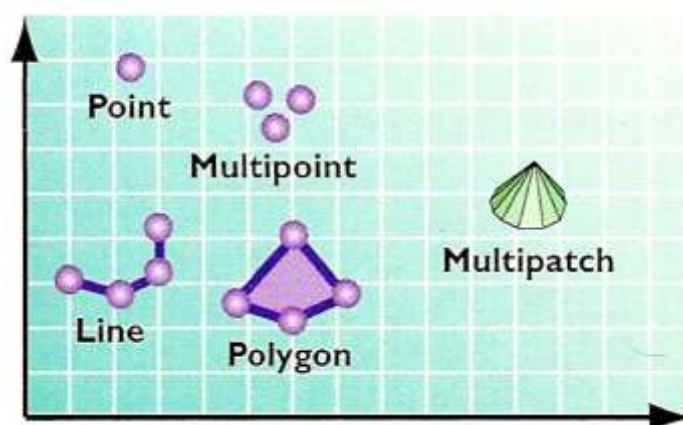


Figura 6: Formas geométricas.

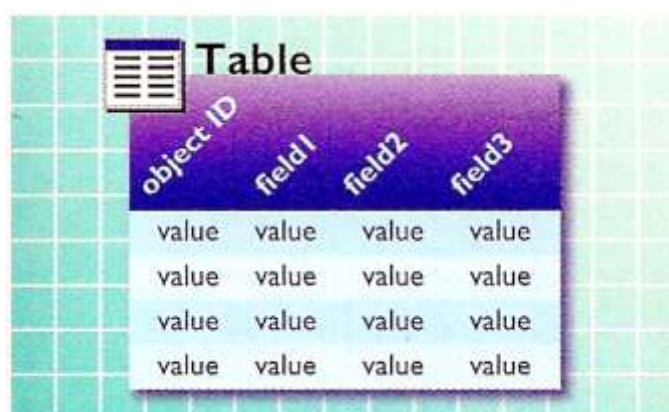
¹⁷ La geodatabase es el formato de almacenamiento de datos de ArcGIS y permite almacenar otros tipos de elementos además de los vectoriales aquí descritos.

¹⁸ Zeiler, Michael. Modeling Our World The ESRI Guide to Geodatabase Concepts. Segunda edición. ESRI Press. Redlands California. 2010. Pág. 55.

¹⁹ Una clase de entidad es una colección de entidades geográficas que comparten el mismo tipo de geometría (tal como punto, línea o polígono) y los mismos campos de atributo para un área común. Las calles, pozos, parcelas, tipos de tierra y distritos censales son ejemplos de clases de entidad. Tomado de:

<http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//00220000001000000.htm>

Atributos: Cada elemento tiene un conjunto de atributos en una tabla. Los campos definen atributos que pueden ser numéricos, textuales o descriptivos. Algunos campos son predefinidos y otros definidos por los usuarios Figura 7.



object ID	field1	field2	field3
value	value	value	value
value	value	value	value
value	value	value	value
value	value	value	value

Figura 7: Tabla de atributos.

Comportamiento: Reglas que garantizan la integridad de los datos entre los elementos y con otras capas. Las reglas aplican a la geometría, atributos y relaciones Figura 8.

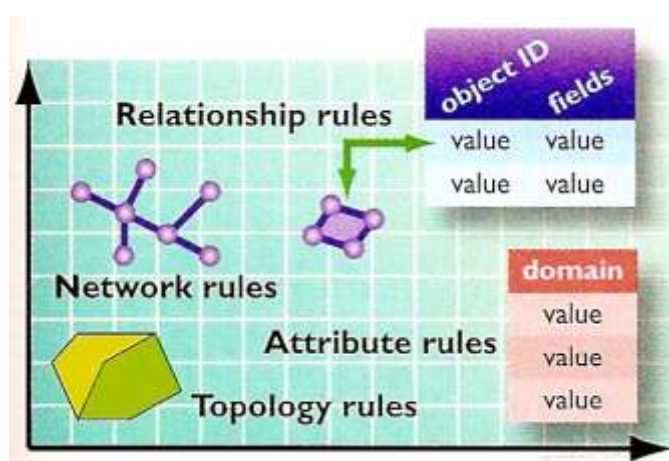


Figura 8: Comportamiento de los elementos.

Relaciones: Permiten establecer las relaciones de los elementos geográficos con otros elementos. Estas relaciones se establecen a través de las uniones y relaciones que permiten asociar en forma dinámica los diferentes elementos de los mapas Figura 9.

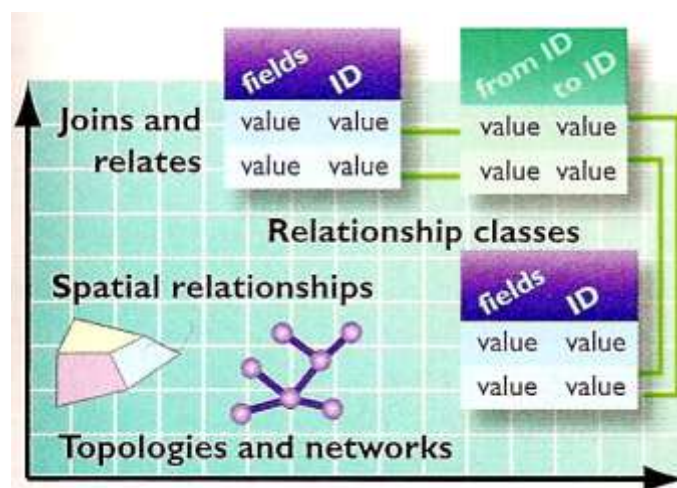


Figura 9: Tipos de relaciones.

Los elementos son extensibles: esta característica permite que los elementos simples o primitivos se puedan extender permitiendo modelar elementos más complejos como es el caso de los puntos y líneas que al extenderlos se pueden modelar las redes o elementos con valores de superficie que permiten crear conjuntos de datos de terrenos o superficie Figura 10.

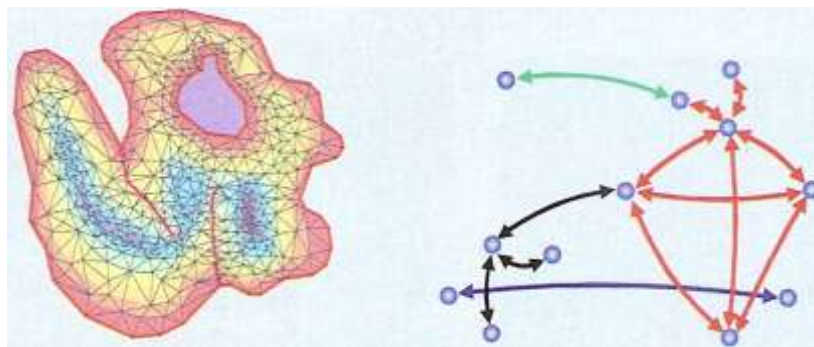


Figura 10: Modelos de terreno y de redes.

3.2 Tiempo

En muchas aplicaciones SIG se trabaja el tiempo como la cuarta dimensión - 4D que tiene unas características y un comportamiento diferente de las tres dimensiones espaciales y que se percibe con un “movimiento” continuo en una sola dirección. Mucha de la información que se almacena en las bases de datos espaciales tienen un componente de tiempo y estos datos temporales se comportan de diferentes formas; como por ejemplo, elementos que se mueven como los vehículos, elementos que cambian de forma al pasar el tiempo como los polígonos de inundaciones, elementos cuyos atributos cambian en el tiempo como los predios o parcelas, y rasters que muestran diferentes estados de una medida o variable en un momento de tiempo dado como las precipitaciones; estos comportamientos de los objetos pueden ser visualizados sobre un mapa que muestra los cambios en un momento o en un intervalo de tiempo dado²⁰. Los aspectos temporales de los datos geográficos son fundamentales para el registro o seguimiento de los cambios, para los procesos que describen, y para la

²⁰ Zeiler, Michael. Modeling Our World The ESRI Guide to Geodatabase Concepts. Segunda edición. ESRI Press. Redlands California. 2010. Pág. 234.

documentación de los planes futuros. Por ejemplo vigilar el cambio de estado de un conjunto de elementos relacionados (Figura 11, izquierda) o vigilar los cambios de objetos en movimiento (Figura 11, derecha).

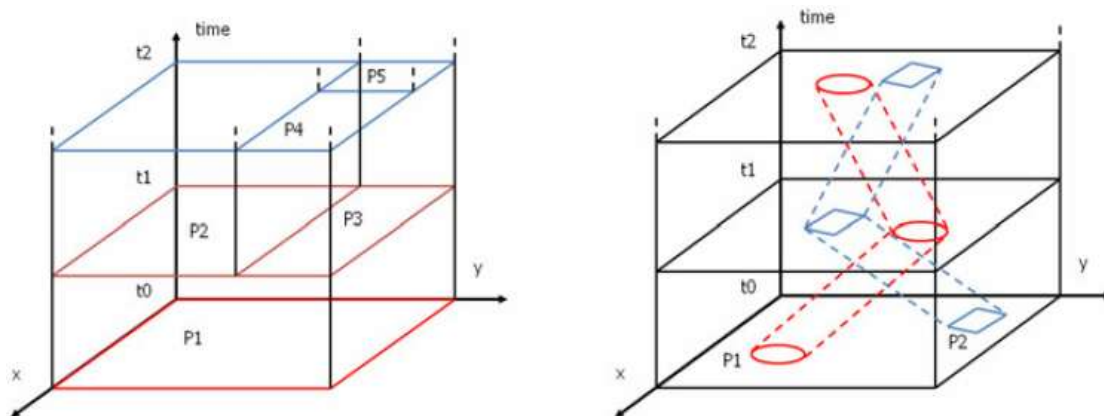


Figura 11: El tiempo como tercera dimensión: división de predios (izquierda) y objetos en movimiento (derecha) ²¹.

Los comportamientos de los objetos espaciales en un marco de tiempo dado se pueden clasificar en cinco clases que se describen a continuación²²:

Procesos espaciales continuos: los atributos espaciales de un objeto cambian de forma continua con el tiempo, como la propagación del fuego, el flujo de las inundaciones y el movimiento de un coche; Figura 11 derecha. Estos cambios siempre están relacionados con un período de tiempo.

²¹ Van Oosterom, Peter, Stoter Jantien. 5D Data Modelling: Full Integration of 2D/3D Space, Time and Scale Dimensions. GIScience 2010, LNCS 6292, pág. 310-324. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010. Pág. 314.

²² Jin, P., Yue, L., Gong, Y.: Research on a Unified Spatiotemporal Data Model. In: International Symposium on Spatial-temporal Modeling, Spatial Reasoning, Analysis, Data Mining and Data Fusion. ISPRS Press, China (2005).

Procesos espaciales discretos: los atributos espaciales permanecen estáticos durante un período y de repente cambiar a otro valor. Un ejemplo típico es el cambio del límite de una parcela de tierra. Los procesos espaciales discretos siempre suceden en un instante concreto.

Procesos temáticos continuos: los atributos temáticos de un objeto cambian en forma continua en el tiempo, tales como cambios de tipo de suelo.

Procesos temáticos discretos: los atributos temáticos básicamente son estáticos, pero pueden cambiar a otro valor de repente, por ejemplo, un cambio de propietario de un predio o parcela de tierra.

Vida discreta: cambios repentinos que resultan en la creación de nuevos objetos, o supresión de los objetos existentes, como la división de un predio o de unión de varios predios; Figura 11 izquierda.

3.3 Escala

La escala es una propiedad esencial en un proyecto SIG²³, que se tienen en cuenta implícitamente cuando se recolectan los datos y define la resolución espacial o el nivel de detalle (LoD²⁴) de los datos geográficos; el uso de la escala en el sentido de resolución espacial define si los datos son almacenados con una

²³ Longley, Paul A., Michael F. Goodchild, Davis J. Maguire, Davis W. Rhind. Geographic Information Systems and Science. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2001. Pg. 3.

²⁴ LoD – Level of Detail.

escala fina incluyendo el registros de objetos pequeños o de escala gruesa si no los incluyen²⁵. Otra forma de referirse a la escala hace referencia a la *escala del mapa* que los cartógrafos utilizan como la fracción representativa del mapa (la proporción de la distancia sobre el mapa y la distancia sobre el terreno) y para ellos una escala grande corresponde a una fracción representativa grande o en otras palabras un completo detalle geográfico²⁶ que permite representar los objetos mas pequeños. La escala que se defina influye sobre la geometría con la que se representan los objetos en la base de datos geográfica. La escala es a menudo esencial para la compensación entre el nivel de resolución espacial y el grado de detalle de los atributos que se pueden almacenar en una aplicación dada²⁷. A veces se hace referencia a la escala como propiedad de la base de datos digital (aunque la definición de escala no tiene sentido para los datos digitales) y con esto lo que se esta especificando es cual es la escala del mapa a partir del cual se capturo la información en la base de datos.

A pesar de que la escala es un concepto bien conocido en el dominio de la tecnología de la geo-información, el considerarla como una dimensión extra de los datos geográficos, integrándola con las otras dimensiones, es un concepto nuevo²⁸ y que podría tener sentido si se considera (de acuerdo a la definición de

²⁵ Longley, Paul A., Michael F. Goodchild, Davis J. Maguire, Davis W. Rhind. Geographic Information Systems and Science. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2001. Pg. 102.

²⁶ ídem.

²⁷ ídem.

²⁸ Van Oosterom, Peter, Stoter Jantien. 5D Data Modelling: Full Integration of 2D/3D Space, Time and Scale Dimensions. GIScience 2010, LNCS 6292, pág. 310-324. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010. Pág. 311.

dimensión) como una unidad de media por ejemplo a lo largo del eje z y cuyos valores podrían estar en un intervalo $[1, n]$ donde 1 que correspondería a una escala 1:1 y n sería el valor de la escala de menor detalle en el proyecto por ejemplo 1:20'000.000; un valor menor que 1 no tendría sentido en un SIG aunque si lo tendría en otros sistemas espaciales. Actualmente se utiliza la variación de la escala en la publicación de mapas donde se aplica el concepto de piramidales lo que reduce la resolución (si subimos en el eje de la escala) o aumenta la resolución (si bajamos en el eje de la escala); aunque esto se aplica a escalas fijas y lo que se buscaría en el nuevo modelo 5D es que se trabaje el cambio de escala o resolución en forma continua.

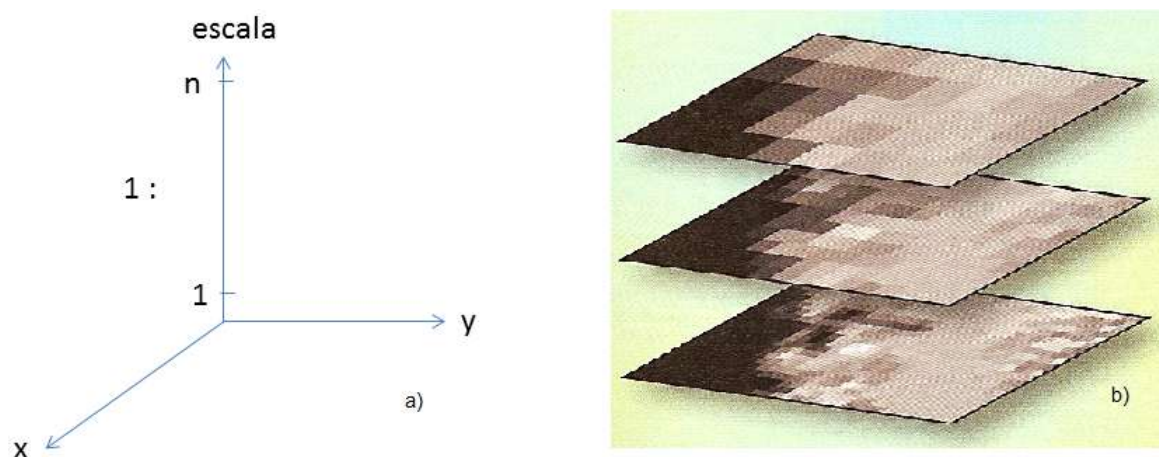


Figura 12: a) 2D + escala, b) Piramidal.

4 REQUERIMIENTOS DEL MODELO 5D

4.1 Propiedades del modelo de geo-datos

Los Modelos de datos espaciales son abstracciones de la realidad que incluyen la discretización necesaria de la realidad para que la realidad sea implementable en un sistema informático; la representación digital de los datos espaciales que describen la realidad es un aspecto clave y consiste en la representación de la geometría de los objetos espaciales – mas el tiempo y la escala - y los valores de los atributos no espaciales asociados²⁹. El modelo de datos espacial debe tener geometrías primitivas espacio3D+tiempo+escala además de las demás cualidades como atributos, relaciones, comportamientos y poder ser extensibles. La implementación de un modelo de datos espacial se caracteriza por las propiedades³⁰ que se muestran en la Figura 13:

²⁹ Bulbul, Rizwan. AHD: Alternate Hierarchical Decomposition Towards LoD Based Dimension Independent Geometric Modeling. Vienna University of Technology, 2011. Pág. 7.

³⁰ ídem.

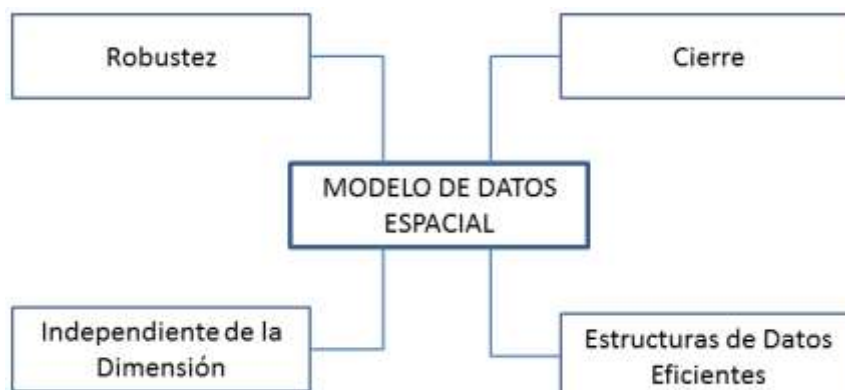


Figura 13: Propiedades de un Modelo de Datos Espacial³¹.

4.1.1 Cierre de las operaciones geométricas

Las primitivas geométricas deben ser algebraicamente cerradas bajo operaciones geométricas como intersección, unión, diferencia, etc. Los resultados pueden ser usados como entradas para operaciones futuras.

4.1.2 Estructura de datos eficiente

Las primitivas geométricas describen la estructura de los objetos espaciales y las estructuras de datos geométricos definen la estructura de almacenamiento y organización de las primitivas facilitando que las operaciones geométricas se ejecuten efectiva y eficientemente. Las estructuras de datos geométricos junto con los algoritmos geométricos suministran los detalles de implementación para alcanzar el comportamiento deseado de las operaciones especificadas en el modelo de datos.

³¹ Bulbul, Rizwan. AHD: Alternate Hierarchical Decomposition Towards LoD Based Dimension Independent Geometric Modeling. Vienna University of Technology, 2011. Pág. 9.

4.1.3 Robustez de los cálculos geométricos

El modelo de representación debe tener en cuenta la precisión aritmética fija disponible en los computadores. Los sistemas actuales utilizan mucho software mejorado para los cálculos geométricos, donde la precisión aritmética ya se tiene en cuenta.

4.1.4 Independencia de la dimensión

Tradicionalmente el enfoque ha sido centrado en las dimensiones o en dimensiones específicas como por ejemplo cuando se trabaja el tiempo como 4D. Los desarrollos de software también siguen este enfoque debido a que se plantean algoritmos centrados en las dimensiones. Existen algunos estudios con métodos independientes de la dimensión aunque al implementarlos se ha requerido código separado para cada dimensión.

4.2 Modelamiento nD

Desde el punto de vista de las aplicaciones de los SIG los atributos de los elementos geográficos se entienden como las dimensiones temáticas. Si tenemos información multi-temática (no espacial) como por ejemplo, un conjunto de datos 5D que se puede obtener de la combinación de los atributos object-id, nombre del cultivo, edad, condición, y fecha del cultivo; a pesar de que son datos 5D estaríamos hablando de atributos temáticos y no de conceptos dimensionales en

el modelamiento de geo-datos³². Se pueden modelar sistemas nD como en el caso de los BIMs³³ que extienden el modelo con características temáticas adicionales que sirven para representar el ciclo de vida de los edificios a través de un modelo de información Figura 14. El modelamiento nD se enfoca en integrar múltiples temáticas y no conceptos multidimensionales.

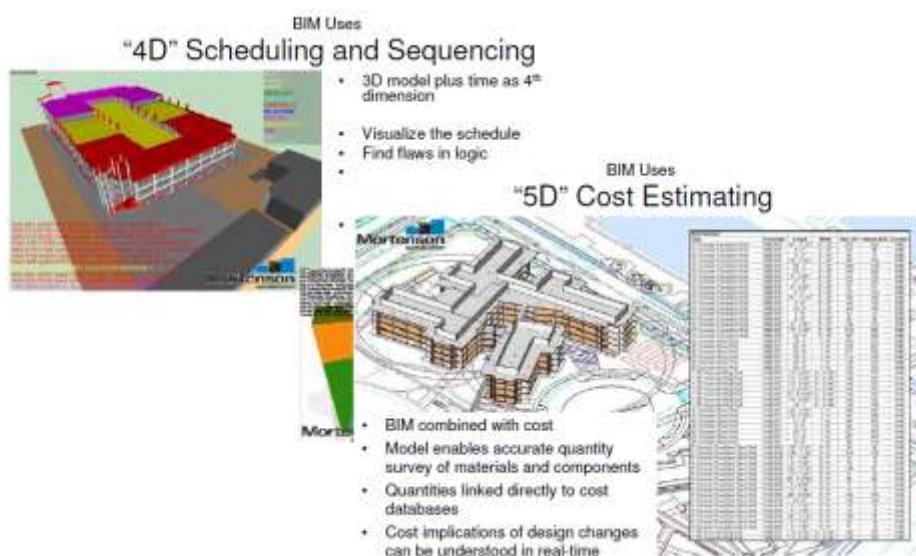


Figura 14: BIM modelo 5D³⁴.

4.3 Modelamiento espacio-temporal

Durante mucho tiempo se han desarrollado modelos espacio-temporales que incluyen una semántica de la dimensión tiempo que varía entre los diferentes modelos planteados y que generalmente cuenta con los siguientes ítems³⁵:

³² Van Oosterom, Peter, Stoter Jantien. 5D Data Modelling: Full Integration of 2D/3D Space, Time and Scale Dimensions. GIScience 2010, LNCS 6292, pág. 310-324. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010. Pág. 313.

³³ BIM – Building Information Models.

³⁴ http://www.web3d.org/x3d/learn/presentations/BIM_Web3D2007.pdf.

1. **Granularidad temporal:** especifica a que unidad de los datos se adiciona un atributo temporal, por ejemplo: a todo el conjunto de datos, a una clase objeto, a una instancia de un objeto o a un atributo.
2. **Operaciones temporales:** Análisis espacio-temporales.
3. **Modelado de base para el tiempo:** describe que tipos de cambio pueden ocurrir a el valor de una característica geográfica o temática, por ejemplo: cambios discretos o cambios continuos o graduales.
4. **Tiempo del sistema (o de transacción):** indica el tiempo de registro de un evento en la base de datos.
5. **Tiempo valido (o del mundo real):** describe el tiempo en que un evento pasó en el mundo real.
6. **Tiempo de vida:** identifica la trayectoria histórica de los elementos del mundo real. Algunos eventos duran solo un corto instante, por ejemplo: una explosión o un accidente de transito, que son como objetos punto. Otras situaciones duran por un largo periodo de tiempo, por ejemplo: el periodo durante el cual un predio tienen un dueño en particular, que son como objetos lineales representados con un intervalo de tiempo.
7. **Representación del tiempo:** puede diferir de mantener la duración del estatus de un objeto (por ejemplo: periodo) para registrar un evento (por ejemplo: momento inicio – final) que implica cambio de estado.

³⁵ Van Oosterom, Peter, Stoter Jantien. 5D Data Modelling: Full Integration of 2D/3D Space, Time and Scale Dimensions. GIScience 2010, LNCS 6292, pág. 310-324. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010. Pág. 314.

El concepto que esta detrás del modelo 5D planteado es una completa integración del espacio 3D, el tiempo y la escala en un modelo que garantice que todos los cambios posibles de geo-información al variar la escala deben ser representados, por ejemplo: cambios en la geometría, topología o atributos, o no cambio del todo. La representación integrada del tiempo no debería solamente soportar cambios en momentos discretos, como actualmente se soporta en algunos modelos mediante versiones o marcas de tiempo, si no también soportar cambios temporales continuos para describir movimientos o cambio de objetos. Se debe tener en cuenta que el modelamiento temporal en si mismo tiene una dimensión de escala, por ejemplo: a que nivel de detalle la dimensión temporal debe ser representada (resolución temporal). El modelo planteado debe prestar especial atención a poder modelar la dimensión multi-escala del tiempo y la interacción con las dimensiones multi-escala de la geometría³⁶. El modelo resultante debe ser un modelo unificado espacio-temporal³⁷ y un tipo de datos espacio-temporal genérico en un sistema manejador de bases de datos³⁸.

De lo anterior se desprende que el modelar el tiempo es complejo y que esta dimensión en si tiene mas dimensiones por esto es necesario restringir en un principio el aspecto del tiempo a modelar y se trabajara inicialmente con el tiempo del sistema por considerarlo mas sencillo de modelar para garantizar un espacio-

³⁶ Van Oosterom, Peter, Stoter Jantien. 5D Data Modelling: Full Integration of 2D/3D Space, Time and Scale Dimensions. GIScience 2010, LNCS 6292, pág. 310-324. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010. Pág. 316.

³⁷ Worboys, M.F.: A unified model for spatial and temporal information: Spatial data: applications, concepts, techniques. Computer journal 37, 26–34 (1994).

³⁸ Jin, P., Yue, L., Gong, Y.: Research on a Unified Spatiotemporal Data Model. In: International Symposium on Spatial-temporal Modeling, Spatial Reasoning, Analysis, Data Mining and Data Fusion. ISPRS Press, China (2005).

tiempo-escala (un modelo/estructura 5D) continuo sin huecos ni sobre posición. Los otros aspectos del tiempo se consideraran en un principio como atributos no integrados.

4.4 Modelamiento multi-escala

El modelo/estructura de geo-datos debe poder trabajar en diferentes niveles de escala de forma continua (sin huecos) de grueso a fino lo que permitirá modelar aplicaciones con menor nivel de detalle o aplicaciones muy detalladas cuando se requieran.

Para poder lograr esto se ha establecido diferentes formas de mantener los datos de una misma realidad geográfica a diferentes escalas. Una forma es mantener diferentes bases de datos para cada escala; esta estrategia es una práctica normal de diferentes agencias cartográficas como es el caso del IGAC³⁹ que mantiene su mapa topográfico a escalas 10.000, 25.000, 50.000, 100.000, 500.000. Otra forma es mantener en una base de datos, los datos mas detallados y a partir de esta base de datos generar datos a escala mas pequeña en el momento que se requiera apoyándose algunas veces en resultados almacenados generados previamente a partir de cálculos geométricos muy costosos en multi-representaciones⁴⁰.

³⁹ IGAC – Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Es la agencia cartográfica de Colombia.

⁴⁰ Van Oosterom, Peter, Stoter Jantien. 5D Data Modelling: Full Integration of 2D/3D Space, Time and Scale Dimensions. GIScience 2010, LNCS 6292, pág. 310-324. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010. Pág. 316.

El diseño e implementación de un modelo/estructura de datos multi-escala es de gran importancia en las IIG ya que permitirá contar con datos de diferentes escalas libres de los problemas que se generan al trabajarlos sobre un mismo mapa ya que al hacer acercamientos o al alejarse los datos no coinciden debido a los diferentes problemas como el manejo de la precisión o la fuente de datos del cual fueron generados. Se han hecho muchas investigaciones desde que el concepto de multi-representación se introdujo⁴¹; algunos ejemplos de soluciones son el modelamiento de múltiples geometrías o el modelamiento de transición entre escalas. Estas iniciativas buscan controlar la redundancia de los datos de multi-representaciones o multi-escala pero lo que se propone actualmente es reducir la redundancia para mejorar la eficiencia y asegurar una mejor consistencia entre las diferentes escalas⁴².

Para entender las implicaciones del modelamiento multi-escala se esta estudiando el modelo IMTOP⁴³ que maneja dos aspectos principales de un modelo de información multi-escala. En primer lugar, que integra los *estados* de datos en las diferentes escalas. En segundo lugar, se formaliza la semántica en las *transiciones* de escala. Estos dos aspectos juntos forman lo que se podría

⁴¹ Buttenfield, B.P., Delotto, J.S.: Multiple representations. Scientific Report for the Specialist Meeting. National Center for Geographic Information and Analysis (NCGIA), p. 87. Technical paper 89-3 (1989).

⁴² Van Oosterom, Peter, Stoter Jantien. 5D Data Modelling: Full Integration of 2D/3D Space, Time and Scale Dimensions. GIScience 2010, LNCS 6292, pág. 310-324. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010. Pág. 316.

⁴³ IMTOP - multi-scale *information model topography*.

llamar la especificación del producto datos de escala-consiente (es decir, objetivo de la generalización)⁴⁴.

Para el diseño del modelo IMTOP primero se modela el contenido de los datos multi-escala y luego se modela la semántica de la transición entre escalas. El contenido se estableció por cada escala de mapa con sus clases, asociaciones, atributos, valores de los atributos y tipos de geometría (posibles geometrías múltiples) requeridos; también se determinó la ocurrencia o ausencia de los objetos en las diferentes escalas y la reducción de información en la transición de escalas como por ejemplo menos atributos o valores de atributos disponibles, pero en algunos casos se adiciona información⁴⁵; una vez modelado el contenido de datos multi-escala se enriquece el modelo con la semántica de la transición entre escalas por ejemplo limitaciones en generalización que requiere el mapa (la distancia mínima entre dos objetos) o limitaciones en la base de datos (los datos deben ser topológicamente correctos) que se deben cumplir estrictamente⁴⁶.

Para poder manejar el espacio continuo en la dimensión de la escala se requiere de una estructura de almacenamiento que permita desplegar la información independiente del valor de la escala; esto quiere decir que debe poder desplegar la información cuando nos acercamos o alejamos del mapa a través de deltas de cambio en el valor de la escala lo que producirá una generalización de los datos en forma continua a través de los deltas de escala; la estructura debe permitir el

⁴⁴ Stoter, J.E., van Oosterom, P.J.M., Quak, C.W., Visser, T., Bakker, N.: A semantic rich Multi-Scale Information Model Topography. Accepted for publication in International journal of geographical information science, IJGIS (2010). Pág 1.

⁴⁵ ídem. Pág 9.

⁴⁶ ídem. Pág 11.

almacenamiento y recuperación de los objetos geográficos con deltas de generalización.

La primera estructura de vario-escala verdadera⁴⁷ para información geográfica donde un delta en escala lleva a un delta en el mapa (y deltas de escalas pequeños llevan a deltas pequeños de mapas e incluyen deltas pequeños infinitesimales) para todas las escalas se llama estructura *tGAP*⁴⁸ suave Figura 15 y esta integrada por un espacio 2D y la representación de la escala es almacenada como una única estructura de datos 3D *culo espacio-escala* (*ssc*)⁴⁹ que esta representado en la Figura 12a.

⁴⁷ van Oosterom, P., Meijers, M. Towards a true vario-scale structure supporting smooth-zoom.14th ICA/ISPRS Workshop on Generalisation and Multiple Representation, 2011, Paris. Pág 1.

⁴⁸ tGAP structure - topological Generalized Area Partitioning.

⁴⁹ ssc - space-scale cube.

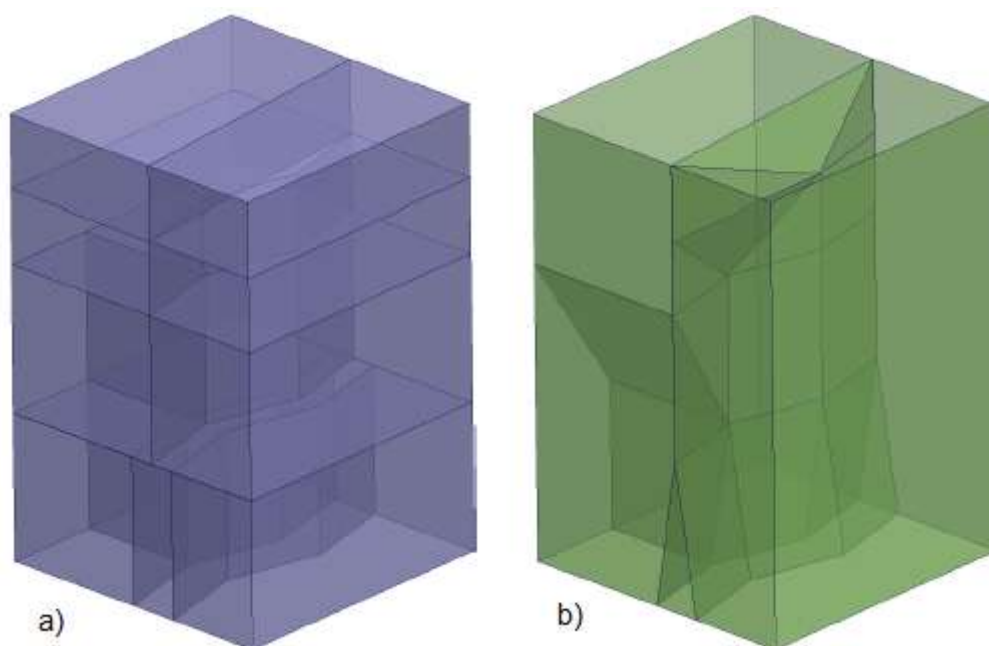


Figura 15: Cubo espacio-escala (ssc) representado en 3D. a) ssc para la estructura tGAP clásica. b) ssc para la estructura tGAP suave.

La estructura tGAP comienza con una partición plana al nivel más detallado (escala grande); luego el objeto menos importante (basado en la geometría y clasificación) se selecciona y se une con el vecino más compatible (de nuevo basado en la geometría y clasificación) y esto se repite hasta que solamente un objeto permanezca; la unión de los objetos se almacena en la estructura de árbol tGAP y el último objeto está en la parte superior del árbol Figura 16.

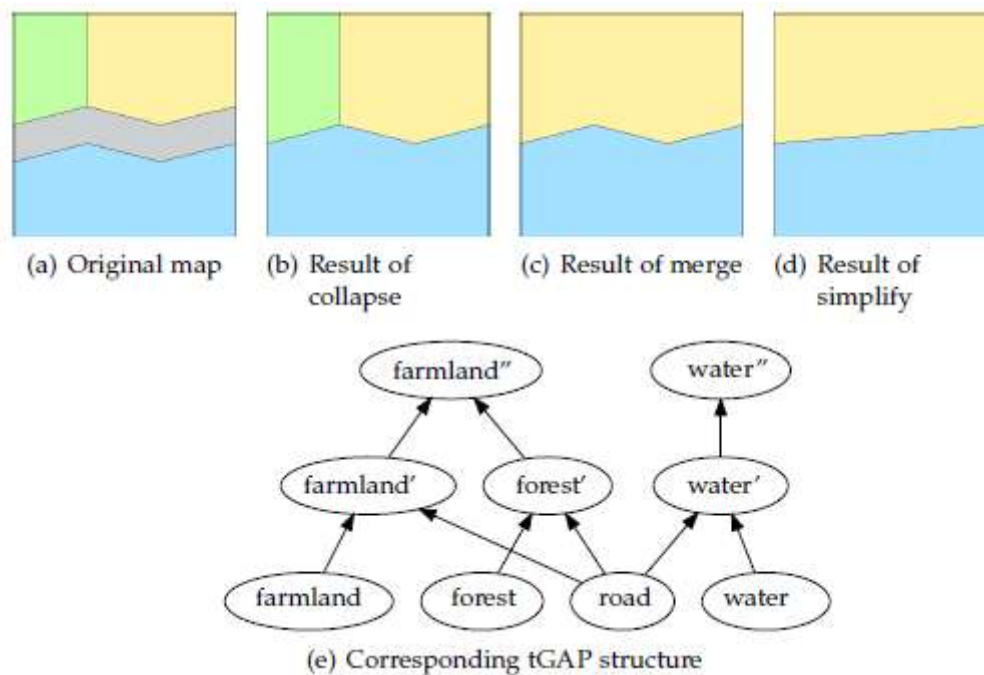


Figura 16: Los 4 fragmentos de mapa y la estructura tGAP correspondiente⁵⁰.

En la Figura 16 podemos ver cuatro fragmentos de mapa que representan una finca (polígono amarillo - farmland), un bosque (polígono verde - forest), un camino (polígono gris- road) y un cuerpo de agua (polígono azul - water) los cuales están representados en *a* (mapa original - Original map). El primer paso es colapsar el camino que es el objeto menos importante y pasa de ser representado en forma de polígono a ser representado en forma de línea en *b* (resultado de colapsar - Result of collapse); el camino se une a los polígonos de finca, bosque y agua. El segundo paso es unir el polígono de bosque a finca como se muestra en *c* (resultado de la unión - Result of merge) y el tercer paso es la simplificación del límite que se muestra en *d* (resultado de la simplificación -

⁵⁰ van Oosterom, P., Meijers, M. Towards a true vario-scale structure supporting smooth-zoom. 14th ICA / ISPRS Workshop on Generalization and Multiple Representation. 2011. Paris. Pág 3.

Result of simplify). En la Figura 16 se muestra la estructura tGAP correspondiente en e (Corresponding tGAP structure).

En la Figura 15 se muestra la estructura tGAP suave en b donde se representa la transición continua de los 4 elementos del mapa a 2 elementos en el mapa. Si queremos un mapa a una escala determinada podemos hacer un corte horizontal y obtener el mapa a la escala dada y si queremos variar en un delta de escala debemos desplazarnos el valor del delta hacia arriba o hacia abajo del valor de escala actual lo que permite desplegar el mapa a cualquier escala arbitraria. En a de la Figura 14 se representa la figura tGAP clásica que corresponde a un almacenamiento de escalas fijas y que no permite la representación de deltas de escala.

4.5 Primitivas 3D

Las geometrías en dimensiones 2D o inferiores (Figura 2) y sus aplicaciones están ampliamente difundidas; en los últimos años se han estado trabajando geometrías 3D que permitan el trabajo de aplicaciones 3D que cada vez son más difundidas y más necesarias gracias también a la evolución de las plataformas tecnológicas. Los investigadores han estado trabajando en buscar cuáles son las estructuras topológicas 3D más eficientes y aún no se ha dicho la última palabra en este aspecto que es crucial para la definición de un modelo 5D. A continuación se presentan dos ejemplos de estas estructuras que podrían ser alternativas de primitivas 3D aunque como se ha mencionado no se cuenta con la última palabra.

4.5.1 DHE⁵¹

La nueva estructura topológica de datos, la doble eje-medio – DHE Figura 18, que permite la representación de topologías de edificaciones 3D (incluyendo sus interior) y el terreno circundante. Esta basada en la idea de almacenar simultáneamente la grafica en un espacio 3D y su eje enlazando los dos. La estructura DHE, permite almacenar explícitamente: (i) la geometría de los elementos el modelo (las diferentes construcciones, habitaciones, el terreno, etc.); (ii) las relaciones topológicas entre los elementos dimensionales (se puede navegar desde un punto dado a todas las caras conectadas, de poliedro en poliedro, etc.); y (iii) los atributos de cualquier elemento en el modelo (puntos, segmentos de líneas, caras y poliedros)⁵².

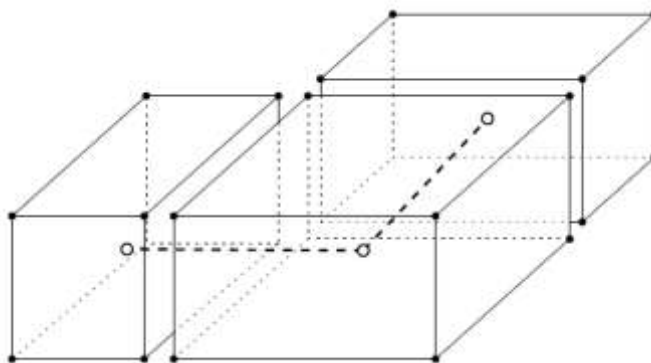


Figura 17: La estructura DHE modela subdivisiones para representar los límites de cada poliedro en forma separada con un grafo (líneas negras), y dos poliedros adyacentes se enlazan por el grafo dual (líneas punteadas). Ambas gráficas están inter-conectadas.

⁵¹ DHE dual half-edge (doble eje-medio).

⁵² Boguslawski, P., Gold, Ch., Ledoux, H. Modelling and analysing 3D buildings with a primal/dual data structure. Preliminary version of a paper accepted for publication in ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. December 17, 2010. Pág 1.

4.5.2 Otras primitivas 3D

Categorías de primitivas 3D para modelar objetos espaciales 3D:

- Poliedro

- Poliedro combinado con parches esféricos y cilíndricos

- Tetraedro

- Objetos CAD

Un poliedro es una colección de caras poligonales conectadas en bordes comunes, que se determinan a partir de vértices comunes, formando un volumen cerrado Figura 19a. Puede ser difícil describir un poliedro correctamente debido a que los vértices de una cara (cuatro o más) deben estar posicionados en el mismo plano. Un poliedro combinado con parches esféricos o cilíndricos hace el modelamiento complejo debido a la elección de hacer un objeto, ya sea con o poliedro con elementos curvos Figura 8b. Esto puede conducir a que el mismo objeto se modela en diferentes formas. Un tetraedro es un caso especial de un poliedro y consta de cuatro triángulos que forman un volumen cerrado Figura 8c. En oposición al poliedro el tetraedro está bien definido ya que los tres vértices de cada triángulo siempre están posicionados en el mismo plano. La categoría final,

los objetos CAD, tienen muchas posibilidades a partir de la construcción de sólidos geométricos y diferentes primitivas⁵³.

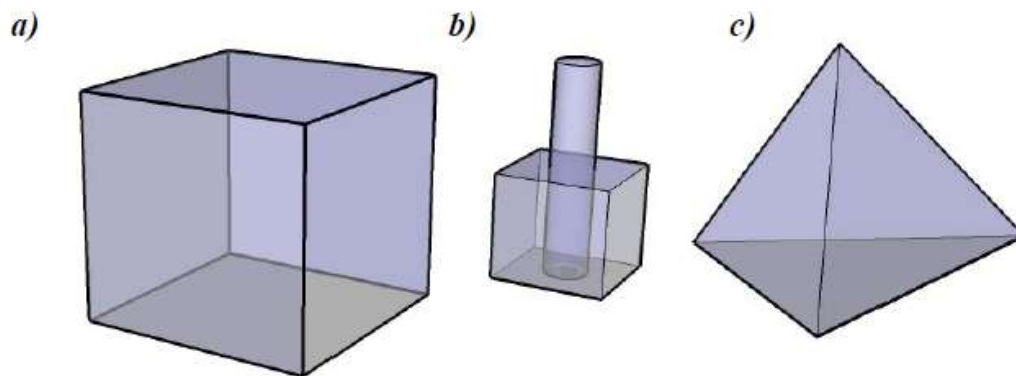


Figura 18: a) Poliedro b) Poliedro con un cilindro c) Tetraedro.

⁵³ Ekberg, F. An approach for representing complex 3D objects in GIS applied to 3D properties. University of Gavle. May 2007. Pág 18.

5 PROPUESTA DE MODELOS 3D

5.1 Consideraciones sobre los modelos

En un modelo cinco-dimensional - 5D se reconocen las dimensionales espaciales o geométricas 0D a 3D, la dimensión tiempo y la dimensión escala. El modelo/estructura 5D de geo-datos que se proponga debe permitir modelar aplicaciones con cinco dimensiones o menos. En la Figura 17 se muestra la relación de cada dimensión con su dimensión superior y se puede ver que para las dimensiones geométricas su relación principal es ser un elemento que construye su geometría es decir que a partir de la primitiva punto de dimensión 0D se construye la primitiva línea de dimensión 1D, a partir de la línea se construye la primitiva polígono de dimensión 2D y a partir de esta de construye la primitiva poliedro de dimensión 3D. La relación a nivel general de las dimensiones geométricas con la dimensión tiempo es de poder representar movimiento o cambios de estados y la relación de las dimensiones geométricas con la dimensión escala es de representación lo que puede significar un cambio de geometría o la no representación del objeto a una escala dada.

dimensiones	0D	1D	2D	3D	t	e
0D	a	c	c	c	m	x
1D	c	a	c	c	m	r
2D	c	c	a	c	m	r
3D	c	c	c	a	m	r
t	m	m	m	m	x	r
e	x	r	r	r	r	x

c - construye la geometría
m - movimiento o cambio de estado
r - representación
a - con aplicación
x - sin aplicación

Figura 19: Matriz de modelos.

La Figura 17 también nos muestra las posibles aplicaciones o SIG que podemos construir a partir del modelo de datos 5D. Podemos ver en la diagonal de las dimensiones geométricas que están marcadas con una a indicando que se debe poder modelar una aplicación a partir de la primitiva 5D; pero también es posible modelar aplicaciones con una combinación de dimensiones a excepción de 0D-escala, tiempo y escala como dimensiones únicas.

Modelo 0D: Permitiría representar objetos con geometría punto a través de los cuales se pueden representar también las características temáticas o atributivas de los puntos. La primitiva 5D nos permitirá extender el objeto y adicionarle la dimensión tiempo convirtiéndolo en un sistema 1D lo que permitirá modelar el movimiento del objeto con geometría punto o un cambio de estado de sus atributos en el tiempo (o ambos). No tendría sentido extender este objeto con la dimensión escala pues su representación geometría no cambia a diferentes escalas.

Modelo 1D: Permitiría representar objetos con geometría punto y línea con sus características temáticas; también se le puede agregar la dimensión tiempo y escala.

Modelo 2D/3D: Los modelos de dos dimensiones o más son los que permiten modelar virtualmente cualquier aplicación SIG. En la propuesta metodológica para desarrollar el modelo 5D los modelos de tres dimensiones son los que se desarrollan en la primera iteración; los modelos son espacio-temporal o espacio2D-tiempo, modelos multidimensionales o 2D-escala y modelos tridimensionales o espacio3D.

5.2 Modelo 5D

La propuesta de modelo se hace basada en la norma ISO/TC 211 Geographic information/Geomatics específicamente en los documentos:

- New Work Item Proposal, Geographic information — Land Administration Domain Model (LADM) - ISO/TC 211 N 2385.
- ISO 19107 Spatial schema
- ISO 19108 Temporal schema

Adicionalmente se considero el documento: OpenGIS® City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard - 2008.

5.2.1 Conceptos básicos

Primero se definen los elementos 5D básicos que se obtienen fácilmente de los tres componentes espacio3D+tiempo+escala. El primer componente hace referencia a la parte geométrica de la primitiva 5D. La parte geométrica de la primitiva 5D define como se representan los objetos geográficos en nuestro modelo. El planteamiento se hace teniendo en cuenta elementos geométricos del dominio vectorial aunque se puede extender los poliedros para representar superficies. Los elementos geométricos primarios son:

- Punto
- Poli línea
- Polígono
- Poliedro

Cada uno de estos elementos geométricos debe permitir representar elementos geográficos en cualquiera de las dimensiones de 0D a 3D; además estas estructuras se almacenan en una base de datos que deben permitir las operaciones de despliegue, consulta, y edición. Los elementos geométricos representan la forma y la localización de los elementos geográficos que se modelan para una aplicación específica.

El segundo componente es el tiempo que dada la complejidad en esta propuesta de estructura 5D se propone modelar el tiempo del sistema y las demás dimensiones del tiempo como tradicionalmente sea manejado es decir como atributos asociados.

El tercer componente es la escala para el cual se debe definir una estrategia para manejarla y si se acepta la estructura tGAP se puede acercar o alejar en la zona de estudio permitiendo el despliegue multi-escala continuo.

5.2.2 Componentes de forma de los elementos

Hay dos componentes de la geometría de los elementos, el primer componente es la forma en la que están basadas por ejemplo punto o polígono; el segundo es la combinación que permite darle forma a los elementos como el multipunto o el anillo. A continuación se listan estos los componentes de las geometrías que permitirán una representación mejor de los elementos geográficos a partir de la primitiva 5D⁵⁴.

1. Punto

- a. Punto
- b. Multipunto
- c. Multipunto coincidente (puntos con diferentes valores de z).

2. Poli-línea

- a. Segmento
 - i. Segmento de línea
 - ii. Curva de Bézier
 - iii. Segmento elíptico
 - iv. Segmento circular

⁵⁴ Los componentes se basan principalmente en la geodatabase de Esri.

- b. Camino⁵⁵
 - i. Poli-línea de un camino
 - ii. Poli-línea de muchos caminos
 - iii. Caminos no conectados
 - c. Anillo
3. Polígono
- a. Un anillo
 - b. Muchos anillos
4. Poliedro
- a. DHE
 - b. TIN
 - c. Poliedro
 - d. Poliedro combinado por ejemplo con cilindro
 - e. Tetraedro
 - f. Objetos CAD
5. Tiempo
- a. Tiempo del sistema
6. Escala
- a. LoD
 - b. tGAP

⁵⁵ Camino corresponde al Path.

5.2.3 Sistema de coordenadas

La referencia espacial se debe poder manejar a través de cualquier sistema de coordenadas ya sea un sistema de coordenadas proyectado o un sistema de coordenadas geográfico. Los valores que debe poder manejar son x , y , z y m ⁵⁶. Los valores de z y m se han considerado opcionales pero un elemento 0D tendrá una localización en el espacio tridimensional y para el caso del sistema 3D espacio2D+tiempo o espacio2D+escala al asignárseles un valor z tendrán su ubicación en el espacio tridimensional.

5.2.4 Modelo/estructura 5D

En la Figura 20 podemos ver los componentes principales del modelo/estructura 5D. Este diagrama (esquema espacial) está basado en ISO 19107 y tiene dos componentes adicionales que son los paquetes tiempo y escala⁵⁷. Estos paquetes permiten completar el modelo geométrico conceptual 3D planteado en la ISO 19107 con las dos nuevas dimensiones y obtener el modelo/estructura 5D.

⁵⁶ m es un valor opcional que permite almacenar medidas sobre las rutas.

⁵⁷ La figura 24 representa los paquetes geométricos y topológicos completos de acuerdo a la ISO 19107.

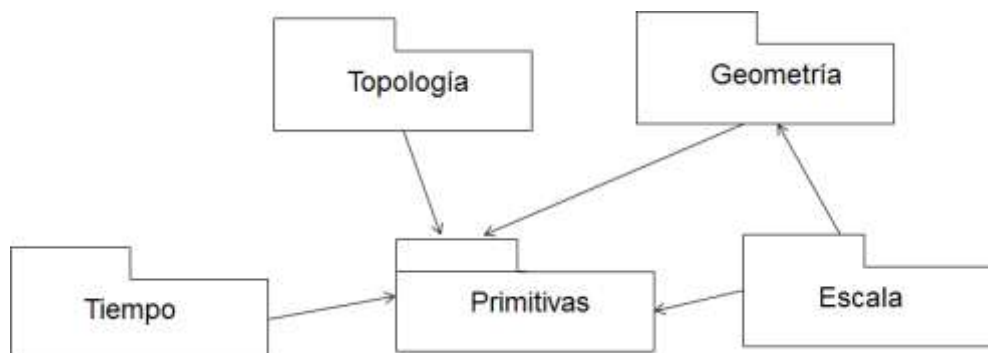


Figura 20: Diagrama principal Modelo/estructura 5D.

Del diagrama de la Figura 20 se desprende que se puede tener unas primitivas con los componentes cinco dimensionales a partir de las cuales se puede modelar cualquier SIG en las dimensiones 0D a 5D. En la Figura 22 se muestran el modelo de las primitivas geométricas de la ISO 19107 el cual se debe extender con los dos paquetes (tiempo y escala). Las primitivas geométricas en la ISO 19107 son punto, curva, superficie y sólido que corresponden a punto, poli-línea, polígono y poliedro definidos para el modelo 5D.

El modelo 5D integrado se muestra en la Figura 21 donde se colocan cuatro niveles. Los primeros tres niveles de abajo hacia arriba corresponden a las geometrías cinco dimensionales y el cuarto nivel está en el ámbito de las aplicaciones o especialización de las geometrías que permiten el diseño e implementación de aplicaciones SIG que respondan a preguntas particulares de la realidad geográfica.

En el nivel de las espacio3D se encuentran las cuatro primitivas base y sus figuras geométricas a partir de las cuales se pueden formar las primitivas como en el caso de los sólidos o poliedros que en algunos casos son estructuras de

almacenamiento o representación de los objetos geográficos. El tener estas formas en el modelo se hace para presentar una serie de alternativas de formas que se pueden utilizar; no se pretende decir que todas las formas se deben implementar y la decisión de que forma implementar se debe tomar una vez se hayan hecho pruebas y se determine cual es la mas optima.

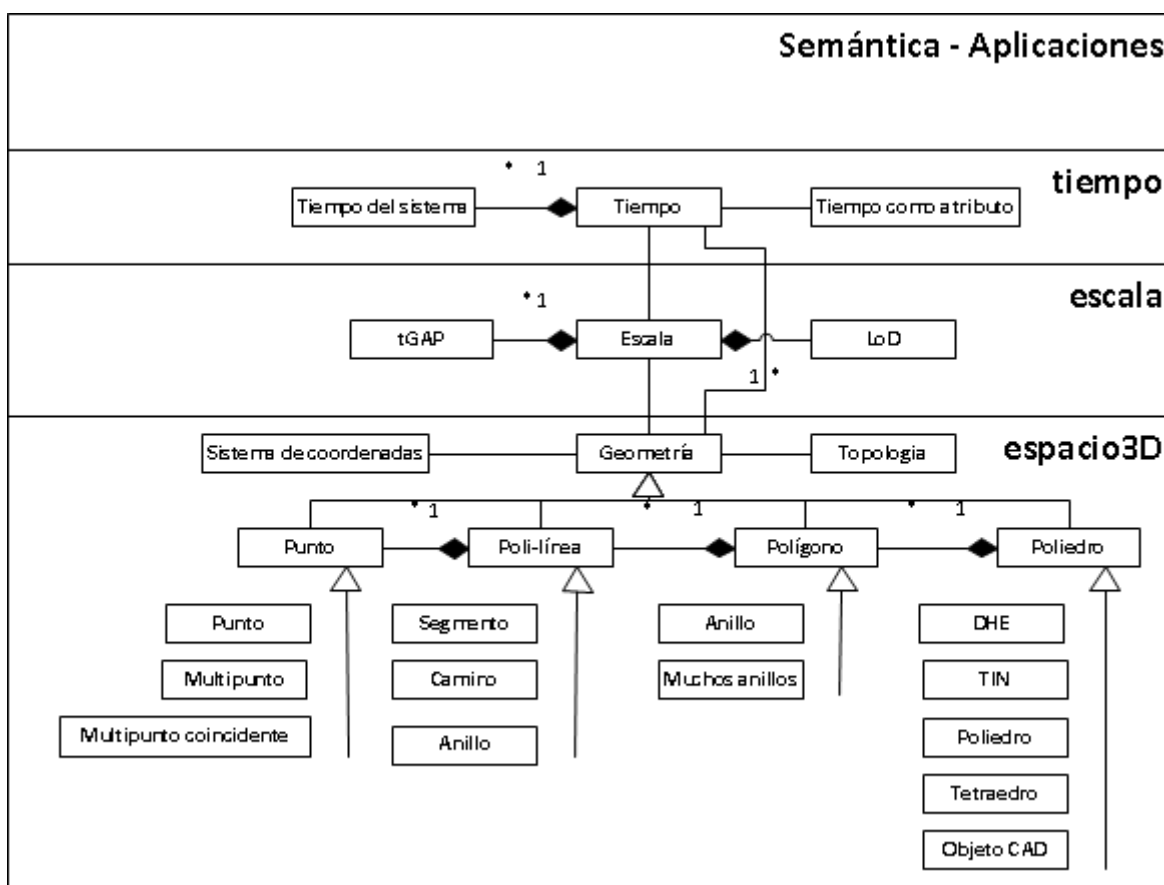


Figura 21: Modelo/estructura 5D integrado

En la Figura 23 se presenta el diagrama de clases de la forma segmento de curva del modelo de la ISO 19107; este diagrama correspondería al detalle de uno de los componentes de Poli-línea.

En el nivel de escala aparecen dos clases LoD y tGAP que responden a dos de las estrategias que se han estudiado para poder manejar los sistemas multi-escala. Por ejemplo el LoD con niveles Lod1 a Lod4 ha sido implementado en el CityGML como una forma de agregación simple. Tal vez el tGAP es la estructura que mejor responde a la representación de la dimensión de la escala ya que permite una representación tanto discreta como continua sobre esta dimensión.

En el nivel tiempo este se representa con dos clases, una clase de la dimensión espacial (tiempo del sistema) y una clase alfanumérica (tiempo como atributo). Esto se hace debido a la dificultad de modelar la dimensión tiempo que en si misma puede tener varias dimensiones.

6 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

La creación de un modelo unificado de información espacial cinco-dimensional sin superposiciones o huecos es un reto ambicioso que de lograrse marcaría un hito en el manejo de la información geográfica y su integración en las infraestructuras de información geográficas IIG. Este reto bien merece la pena ser trabajado por los beneficios que traería en para el proceso de integración de la información geográficas a diferentes niveles y que esta siendo buscado a través de las miles de fuentes de datos que se encuentran en la nube y la proliferación de software y aplicaciones SIG en la nube que buscan que el compartir información entre los usuarios sea un requisito en cualquier SIG de una forma cada vez mas fácil.

La tecnología actual no permite la construcción de SIG 5D; esto se debe principalmente a que se requieren nuevos sistemas manejadores de bases de datos sobre los cuales se puedan construir la estructuras de almacenamiento, administración, despliegue, consultas, etc. que soporten el nuevo modelo/estructura 5D. Adicionalmente a esto no se tiene una definición de cuales estructuras de almacenamiento que soporten las diferentes dimensiones son las más adecuadas. El manejo de las operaciones espaciales aun no han sido completamente definido y mucho menos implementado en el dominio 3D.

Como se ha mencionado un modelo 5D como el que se quiere implementar es un trabajo ambicioso que busca además estandarizar el manejo de la información lo que permitiría mayor productividad al poder reusar mucha información en diferentes SIG; pero no considero que sea posible que un modelo nos permita

modelar cualquier realidad geográfica ya que en cada vez cada se propone y acepta un modelo surgen nuevas realidades o particularidades de una realidad que deben ser modeladas. La búsqueda de un modelo unificados nD es una tarea que se continuara haciendo hasta y que surge como un paralelo en la física como lo es la teoría del campo unificado.

El modelo debe cumplir con las siguientes características:

1. Un modelo/estructura unificado 5D que permita representar el espacio3D+tiempo+escala.
2. Debe tener una estructura que permita un almacenamiento altamente eficiente en un motor de bases de datos espaciales.
3. Debe ser extensible. Esto es que a partir de sus primitivas se pueda generar nuevas geometrías que permitan representar cualquier realidad geográfica.
4. Una estructura de datos que permita un despliegue o visualización altamente eficiente. Un despliegue en tiempo real de grandes volúmenes de información y que el despliegue sea realístico.
5. Contar con operaciones espaciales que permitan consultar, administrar, procesar, e intercambiar la información geográfica cinco-dimensional.

La investigación que lleve a la creación de un modelo 5D se debe basar en los estándares definidos para el manejo de la información geográfica como son las normas ISO 211 y los estándares del Open GIS. Hay muchísimo trabajo por hacer antes de llegar a un modelo cinco dimensional y la estrategia planteada es clara y

se debe trabajar en este sentido desarrollando inicialmente tanto las los modelos/estructuras 3D (espacio2D+tiempo, espacio2D+escala y espacio3D) cuyas aplicaciones son las que están mas ampliamente difundidas. Luego se debe continuar con los modelos/estructuras 4D (espacio3D+tiempo, espacio3D+escala y espacio2D+tiempo+escala) para por ultimo terminar con el modelo/estructura 5D. En cada uno de estos pasos se debe hacer prototipos con datos reales que permitan medir la eficiencia de los modelos planteados y probar la conveniencia de estructuras como la tGAP. Para lo cual se requiere del desarrollo herramientas de software que soporten el fundamento matemático y conceptual que hay detrás de los modelos planteados.

BIBLIOGRAFIA

Boguslawski, P., Gold, Ch., Ledoux, H. Modelling and analysing 3D buildings with a primal/dual data structure. Preliminary version of a paper accepted for publication in ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. December 17, 2010.

Buttenfield, B.P., Delotto, J.S.: Multiple representations. Scientific Report for the Specialist Meeting. National Center for Geographic Information and Analysis (NCGIA), p. 87. Technical paper 89–3 (1989).

Ekberg, F. An approach for representing complex 3D objects in GIS applied to 3D properties. University of Gavle. May 2007.

Foley, J. D., van Dam, A., Feiner, S. K., and Hughes, J. F., 1990. Computer Graphics: Principles and practice, 2nd ed. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. USA.

Hawking, S., Mlodinow, L., El Gran Diseño. Critica, 2010.

ISO/TC 211 Secretariat. Text of 19108 Geographic information - Temporal schema, as sent to the ISO Central Secretariat for registration as FDIS. 2002-02-08.

Jin, P., Yue, L., Gong, Y.: Research on a Unified Spatiotemporal Data Model. In: International Symposium on Spatial-temporal Modeling, Spatial Reasoning, Analysis, Data Mining and Data Fusion. ISPRS Press, China (2005).

Kim, Joon-Seok. ISO19107 Geographic information – Spatial schema. Pusan National University.

Longley, Paul A., Michael F. Goodchild, Davis J. Maguire, Davis W. Rhind. Geographic Information Systems and Science. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2001.

Open Geospatial Consortium Inc., OpenGIS® City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard. Version: 1.0.0. Date: 2008-08-20.

Penninga, F., 3D Topography A Simplicial Complex-based Solution in a Spatial DBMS. NCG, Nederlandse Commissie voor Geodesie, Netherlands Geodetic Commission P.O. Box 5058, 2600 GB Delft, The Netherlands. 2008.

Schneider, M., *Spatial Data Types: Conceptual Foundation for the Design and Implementation of Spatial Database Systems and GIS*. FernUniversität Hagen Praktische Informatik IV D-58084 Hagen. Germany.

Stoter, J.E., Van Oosterom, P.J.M., Quak, C.W., Visser, T., Bakker, N.: A semantic rich Multi-Scale Information Model Topography. Accepted for publication in *International journal of geographical information science*, IJGIS (2010).

Van Oosterom, P., Stoter J. 5D Data Modelling: Full Integration of 2D/3D Space, Time and Scale Dimensions. *GIScience 2010*, LNCS 6292, pg. 310-324. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010.

Van Oosterom, P., Maessen, B., Quak, C.W.: Generic query tool for spatio-temporal data. *International Journal of Geographical Information Science* 16, 713–748 (2002).

Van Oosterom, P., Meijers, M. Towards a true vario-scale structure supporting smooth-zoom. 14th ICA/ISPRS Workshop on Generalisation and Multiple Representation, 2011, Paris.

van Oosterom, P., The tGAP structure: minimizing redundancy and maximizing consistency and offering access at any LoD. Delft University of Technology. INSPIRE Multiple-Representation and Data Consistency Workshop, Ispra (VA, Italy) on 7-8 November 2006.

Worboys, M.F.: A unified model for spatial and temporal information: Spatial data: applications, concepts, techniques. *Computer journal* 37, 26–34 (1994).

Yeting, Z., Qing, Z., GeoScope: Full 3D Geospatial Information System Case Study. *Geo-spatial Information Science* 14(2):150-156 Volume 14, Issue 2. June 2011.

Zhua, Q., Li, F., Zhanga, Y., Unified Representation of Three Dimensional City Models. ISPRS Workshop on Service and Application of Spatial Data Infrastructure, XXXVI(4/W6), Oct.14-16, Hangzhou, China.

Anexos

Diagramas ISO 19107 – Información geográfica – Esquema espacial

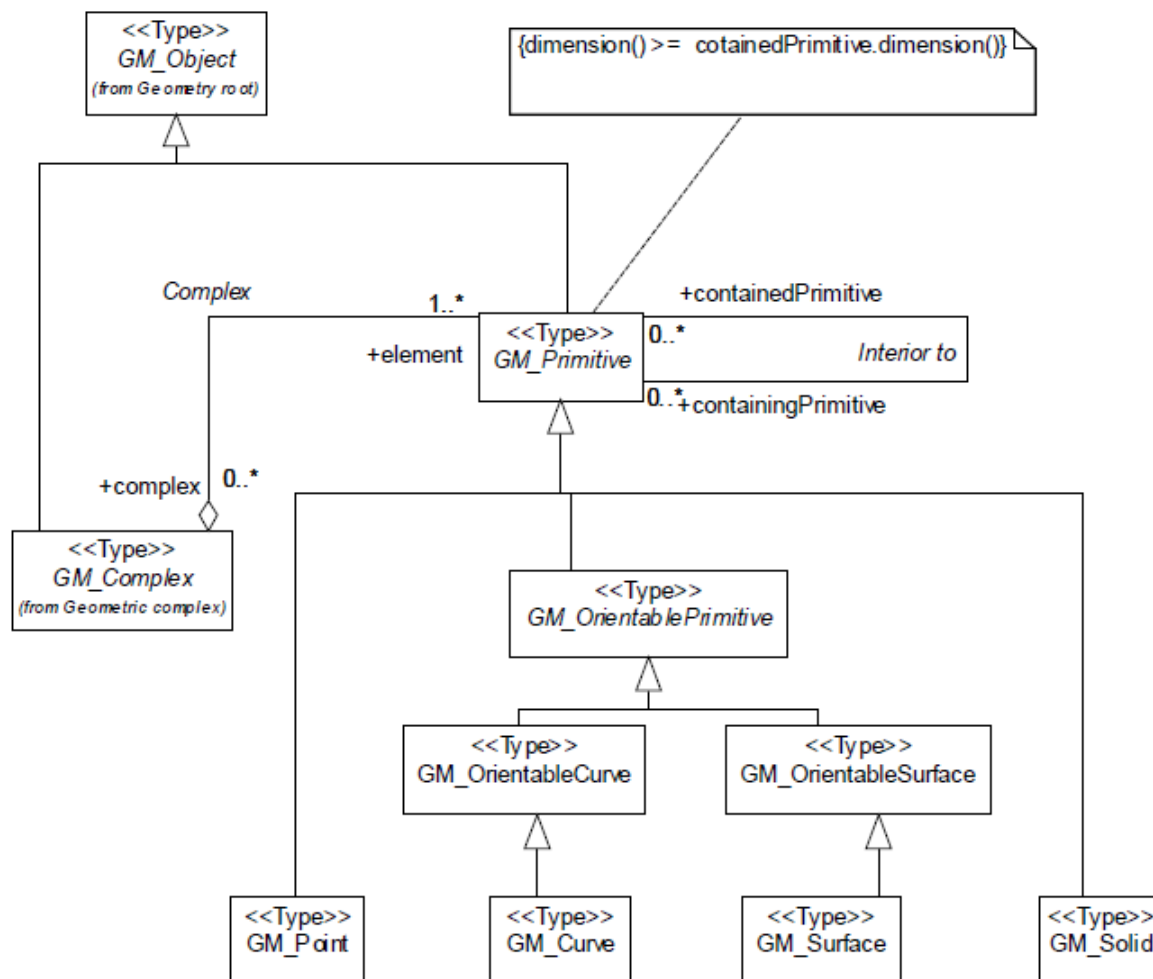


Figura 22: Primitivas geométricas.

La ISO 19107 contiene los esquemas conceptuales que describen y permiten manipular las características espaciales. En la Figura 22 se representan las primitivas espaciales de acuerdo a la ISO 19107 con sus clases padre y clases hijo que heredan las características del padre. La clase `GM_Primitive` hereda las características de `GM_Object` y contiene la definición de dimensión geométrica;

las clases GM_Point, GM_Curve, GM_Surface y GM_Solid corresponden a los objetos representados en la Figura 2.

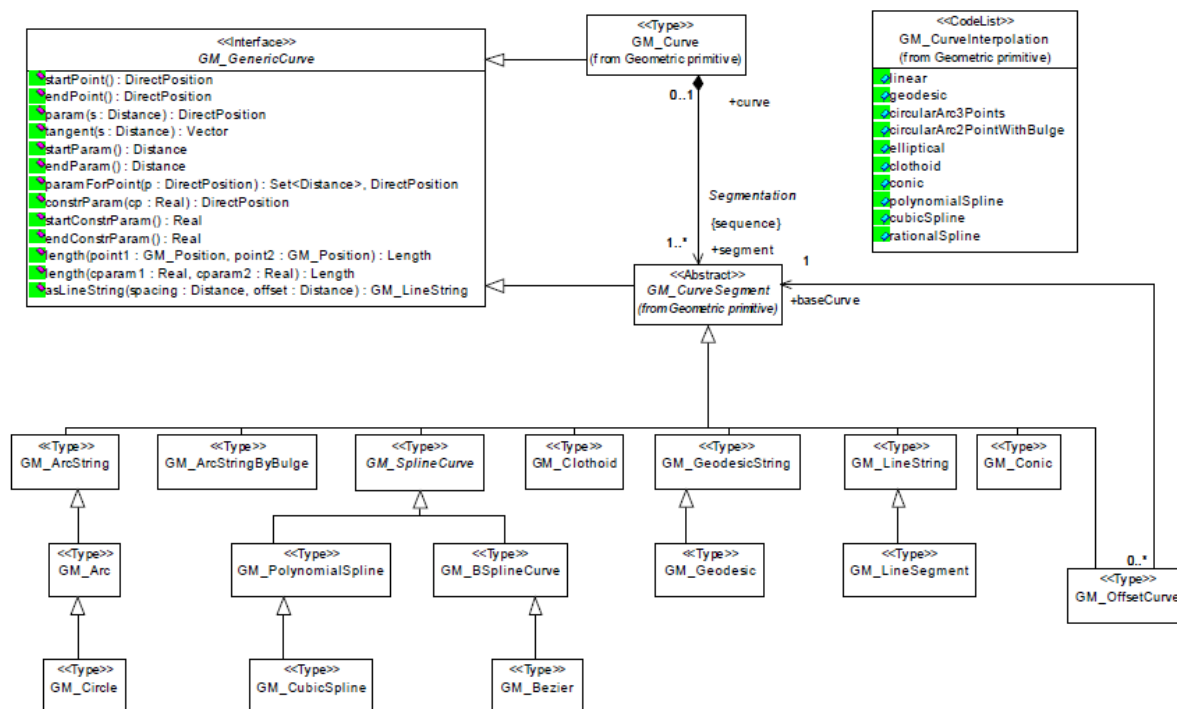


Figura 23: Clases de segmentos de curva.

En la figura 23 se representan las clases necesarias para construir un objeto de una dimensión que en la norma ISO 19107 recibe el nombre de curva. Los objetos de una dimensión pueden ser representados a través de diferentes formas geométricas como por ejemplo un segmento de línea GM_LineSegment o un círculo GM_Circle. Cada primitiva geométrica debe tener un diagrama de clases que represente las formas geométricas con las cuales se pueden representar. Adicional a la representación geométrica el modelo debe contener las clases necesarias para la representación de las relaciones espaciales y esto se hace a través de las clases con las que se modela la topología; en la Figura 24 se representa los paquetes que contienen las diferentes clases tanto geométricas

como topológicas y las relaciones entre los paquetes; lo que permite la el modelamiento de un sistema 3D.

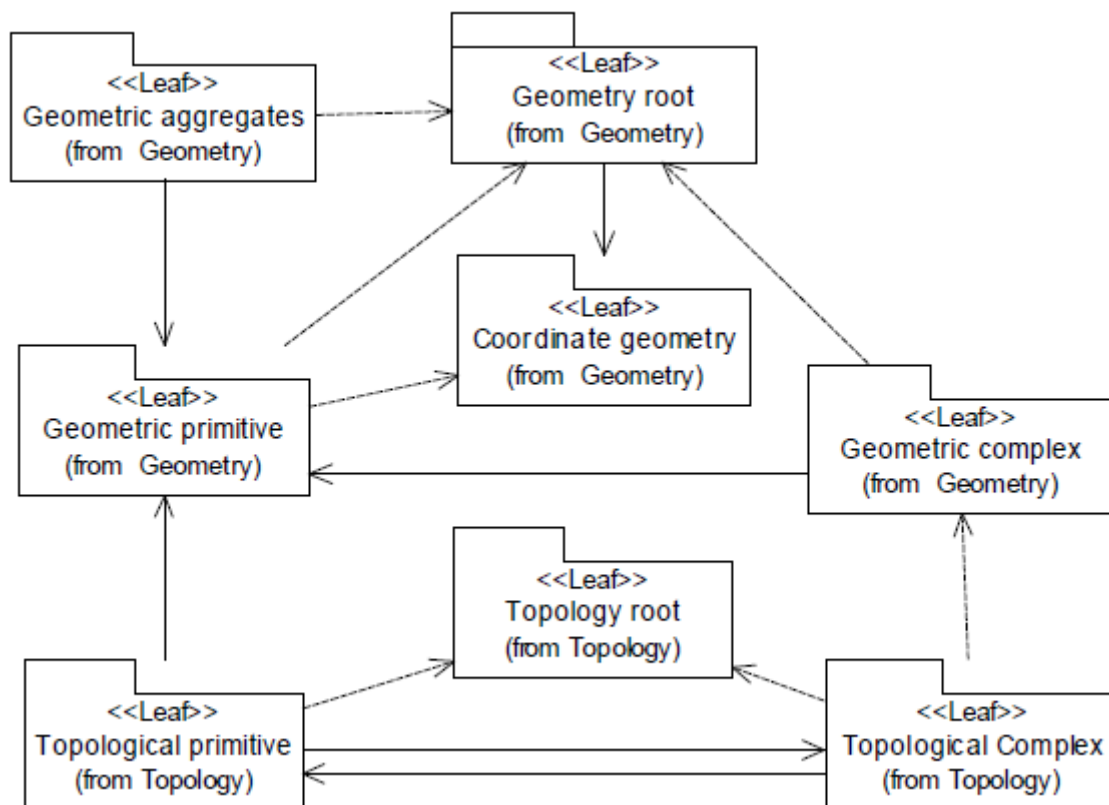


Figura 24: Paquetes geométrico y topológico.