



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS
DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD ZACATENCO

DEPARTAMENTO DE COMPUTACIÓN

“Modelo Espacial-Temporal para Sistemas
Dinámicos Discretos en Sistemas de
Información Geográfica”

Tesis

Que presenta

Andrés Bernal Jiménez

Para obtener el Grado de

Doctor en Ciencias en Computación

Director de la Tesis

Dr. Sergio Víctor Chapa Vergara

Ciudad de México

Enero 2018

Agradecimientos

A Dios, por brindarme el don de la vida y regalarme una familia maravillosa.

A mi madre querida: *A ti mi charrita, mi guía en esto que se llama vida, gracias por todo ese amor que me has brindado, por tus consejos, regaños y tu apoyo incondicional. Contigo a mi lado nunca me ha faltado y tu amor me hecho lo que soy, muchas gracias, te quiero mucho.*

A mis hermanos: *Pacorro, muchas gracias por todo tu apoyo, por enseñarme, por ser junto a mamá la mejor familia que uno pueda tener. Y a ti Chuchin, por tu cariño de hermano, pero deber saber que la vida no es tan fácil, echales ganas, tendrás siempre mi apoyo, los quiero mucho.*

A la gosera: *A ti Lupita Plata, por compartir tu vida junto a la mía, por convertirte en pilar de ella, por coincidir y ser la compañera que deseé en esta vida. Por tu amor incondicional y la felicidad que me brindas. Te amo mucho.*

A mi familia: *Gracias a mi querida familia, por todo su cariño y todos esos momentos maravillosos que hemos compartido, a todos ellos gracias. En especial, a mi tío Edi que has estado ahí apoyandome desde el principio, compartiendome tus enseñanzas y tus acertados consejos.*

A mis profesores: *A ellos que a lo largo de estos años de estudio, siempre fueron punto de apoyo para lograr terminar mi doctorado.*

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por haberme proporcionado el apoyo económico para sustentar mi estancia durante el tiempo que realicé mis estudios de doctorado.

A mis amigos: *Agradezco a todos mis amigos, que siempre estuvieron ahí para tenderme la mano, por la amistad que siempre me brindaron, y que a lo largo de estos años siempre he tenido certeza de contar con todo su apoyo, muchas gracias.*

A mi asesor: *Dr. Sergio Chapa Vergara, gracias por su confianza que ha depositado en mí, por su paciencia y dedicación para dirigir este trabajo, y principalmente por sus enseñanzas.*

Agradezco al Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional por brindarme la formación, apoyos económicos y las herramientas suficientes durante mis estudios de doctorado.

A las secretarias *A las secretarias Sofy, Erika y Felipa. Gracias por su apoyo en los trámites y por hacer del Departamento de Computación un mejor lugar*

Índice general

Agradecimientos	III
Índice de Figuras	VII
Resumen	VIII
Abstract	IX
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes y línea de investigación	1
1.2. Motivación	2
1.2.1. Reporte Towards 2020 Science	2
1.2.2. Modelado en Sistemas de Información Geográfica	3
1.3. Planteamiento del problema	5
1.4. Propuesta de la tesis: Objetivos	7
1.5. Descripción del documento	8
2. Sistemas de Información Geográfica	9
2.1. Antecedentes	9
2.1.1. Captura de datos, administración de datos y tecnología de base de datos	12
2.1.2. Estructuras de datos y algoritmos, topología y base de datos espaciales	14
2.1.3. Análisis espacial y estadística geográfica	15
2.1.4. Visualización y “queries” dinámicas	17
2.2. Proyectos de Sistemas de Información Geográfica	20
2.2.1. Características principales de los Sistemas de Información Geográfica	21
2.2.2. OpenGIS y metadatos	22

3. Modelos y simulación geográfica	23
3.1. Clasificación de modelos	23
3.2. Modelos espaciales y SIG	25
3.3. Sistemas dinámicos y modelos temporales	25
3.3.1. Modelos basados en Ecuaciones Diferenciales Parciales	25
3.3.2. Modelos basados en el Método Montecarlo	26
3.3.3. Modelos basados en Autómatas Celulares (AC)	27
3.3.4. Modelos basados en Sistemas Multi-Agentes (SMA)	30
3.4. Modelos para el análisis geoespacial	31
4. Modelo Espacial	33
4.1. Conceptualización del modelo espacial	33
4.2. Modelado espacio-temporal	35
4.2.1. Abstracción del modelo espacial	36
4.2.2. Teselaciones Espaciales	37
4.2.3. Modelos de datos espaciales	39
4.3. Meta-modelo espacial	40
4.3.1. Meta-modelo espacial propuesto	40
4.3.2. Estructuras teseleadas	41
4.3.3. Plataforma del meta-modelo espacial	44
5. Modelo Dinámico	50
5.1. Meta-modelo dinámico	50
5.1.1. Conceptos clave de un Autómata Celular	50
5.1.2. Estructura de un AC	51
5.1.3. AC como modelo de simulación en SIG	52
5.1.4. Diferentes escalas espaciales	53
5.1.5. El AC genérico como núcleo del meta-modelo	54
5.1.6. Estados de las células	55
5.1.7. Reglas de transición	55
6. Implementación del Modelo GEOSDD	56
6.1. Sistema GEOSDD	56
6.1.1. Descripción general	57
6.1.2. Metodología	57

6.2. Caso de Estudio: Uso de Suelo	58
6.2.1. Crecimiento urbano	58
6.2.2. Resultados	59
7. Conclusiones y Trabajo Futuro	66
7.1. Conclusiones	66
7.1.1. Modelo GEOSDD	66
7.2. Trabajo Futuro	67
7.3. Publicaciones	68
Apéndices	69
A. Funciones espaciales para teselaciones cuadradas	69
B. Funciones espaciales para teselaciones hexagonales	74
Bibliografía	85

Índice de figuras

2.1. Esquema de Un GIS (por sus siglas en inglés como sistema automatizado de información geográfica y datos del LANDSAT, cuyos autores son Ellen M. Knapp y Deborah Rider.	10
2.2. Ejemplo de graficación del sistema SYMAP	11
2.3. Cubo multidimensional del espacio, tiempo y atributos, donde cada tema apunta a un modelo de base de datos (adaptado de [Harrower, 1999]:14 y [Ott y Swiaczny]:4	12
2.4. Gráfica de relación entre el volumen de datos y su complejidad.	13
2.5. Mapa de red topológica del clásico sistema POLYVRT para manejar información geográfica. Desarrollado por Nicholas Chrisman en el Laboratory of Computer Graphics and Spacial Analysis de la Universidad de Harvard [Peucker 1975]. Se describen la representación externa de estructuras de datos: 1) Polígonos y nodos 2) Nodos y coordenadas geográficas.	16
2.6. Mapa de red topológica del clásico sistema POLYVRT para manejar información geográfica. Desarrollado por Nicholas Chrisman en el Laboratory of Computer Graphics and Spatial Analysis de la Universidad de Harvard [Peucker 1975]. Se describen la representación interna de estructuras de datos: 1) Polígonos y nodos 2) Nodos y coordenadas geográficas	17
2.7. Mdim eXplorer incluye una colección de métodos interactivos como consultas dinámicas que permiten visualizar información y llevar a cabo análisis visual, especialmente a los requerimientos de muchos datos temporales y multivariados. La características dinámicas son importantes para la visualización analítica de los datos.	18

2.8.	En el sistema de consulta <i>Dynamic HomeFinder</i> cada punto satisface la consulta descrita por los cursores para localización, costo, tipo de casa, etc. Los puntos iluminados pueden ser seleccionados para generar una descripción detallada [Ahlberg1992].	19
3.1.	(a) Vecindades de Moore, von Neumann y Vecindad en red. (b) Vecindad en una red Voronoi (gris), basado en una cobertura de propiedad.	29
3.2.	Análisis espacial sobre tres capas.	31
4.1.	Diagrama general del Meta-modelo Espacial	42
4.2.	Descripción la interacción de las capas de información y el conjunto funciones de espaciales para el teseleado	43
4.3.	Diagrama de la Plataforma del Meta-modelo Espacial	45
4.4.	Componentes principales del modelo espacial en el SIG	46
4.5.	Mapas de la zona urbana de la Ciudad de México	47
4.6.	Estructuras teseleadas para cinco capas de datos espaciales, cuadrada y hexagonal respectivamente	49
5.1.	Vecindades de Neumann y Moore	52
5.2.	Refinamiento y relaciones de las vecindades verticales	54
6.1.	Principios de funcionamiento del sistema simulación GEOSDD	57
6.2.	Clasificación de 7 estados a partir de las capas históricas (2001)	60
6.3.	Simulaciones obtenidas para el escenario 1	61
6.4.	Clasificación de 10 estados a partir de las capas históricas (2001)	63
6.5.	Simulaciones obtenidas para el escenario 2	64

Resumen

Lo que ocurra, ocurre en espacio y tiempo. Por lo tanto, nuestra percepción del mundo es inherentemente espacial y temporal: los objetos tienen una ubicación y los eventos están incrustados en un flujo de tiempo. Usamos modelos para comunicar pero también para entender el mundo nosotros mismos, y jugando con los modelos descubrimos cómo funcionan y pueden representar el futuro.

Esta tesis presenta el modelo GEOSDD, un modelo espacial-temporal para sistemas dinámicos discretos en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y es el resultado de nuestro trabajo doctoral. Este modelo espacial-temporal plantea una alternativa para el estudio de sistemas dinámicos en los SIG. La propuesta deriva de la búsqueda de un modelo que pueda conjuntar las ventajas de los SIG y el uso de clásicos modelos espaciales para estudiar fenómenos ecológicos/biológicos y geográficos/sociales.

Los sistemas dinámicos discretos sobre información geográfica temática apunta a buscar nuevos problemas: sincronidad, auto-organización y comportamiento emergente; que son clásicos en la ciencia de sistemas complejos. El modelado se complica al proponer un modelo espacial-temporal que define la simulación para un rango de sistemas discretos sobre un sistema de información geográfica. Las interrogantes son: ¿es posible definir y generalizar un modelo con estas características?, ¿qué retos se presentan para su implementación?.

Abstract

Whatever occurs, occurs in space and time. Therefore our perception of the world is inherently spatial and temporal: objects have a location, and events are embedded in a stream of time. We use models for communication but also for understanding the world ourselves, and by playing around with models we discover how they work and how the world they represent may evolve in the future.

This thesis presents the GEOSDD model, a Spatial-Temporal Model for Discrete Dynamic Systems in Geographic Information Systems (GIS). This spatial-temporal model proposes an alternative to study for dynamic systems in GIS. The proposal derives from the search for a model that combines GIS and classic spatial models to study for ecological, biological and social phenomena.

Discrete dynamic systems with thematic geographic information aim to find new problems: synchronicity, self-organization and emergent behavior; which are classics in the science of complex systems. Modeling is complicated by proposing a spatial model that defines the simulation for a range of discrete systems on a geographic information system. The questions are: is it possible to define and generalize a model with these characteristics? what challenges are presented for its implementation?.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes y línea de investigación

Un importante reto que se enfrentan los modelos espaciales-temporales en sistemas dinámicos es la conceptualización de modelos teóricos desarrollados desde el mundo físico. El modelado en sistemas dinámicos se ha diversificado a la integración de con SIG como herramientas para el estudio de diversos fenómenos. Actualmente, la generalización de los modelos se ha incrementado, nuevas herramientas de análisis espacial han permitido crear plataformas de simulación capaces de manipular estructuras espaciales y aplicar modelos espaciales de simulación a estas. A estas plataformas de simulación, se consideran como plataformas de simulación genérica, es decir, tratan de simular diversos fenómenos que comparten características en común. Sin embargo, la implementación de este tipo de plataforma no es trivial, así como los modelos de donde derivan no son fáciles de platear; a estos modelos se le conoce como modelos genéricos de simulación. En el planteamiento un modelo genérico de simulación, dos de los aspectos importante que se consideran son: el aspecto espacial y dinámico.

Con esta línea de investigación y con antecedentes de proyectos de investigación relacionados con sistemas dinámicos discretos, modelos espaciales, autómatas celulares y sistemas de información geográfica. Se propuso desarrollar un modelo espacial-temporal que definiera un sistema de simulación para sistemas dinámicos en SIG. En este sentido la importancia de tal objetivo es la obtención de una herramienta eficaz para el desarrollo de nuevas aplicaciones de simulación y estudio de la dinámica en un rango delimitado de

fenómenos.

Como punto de partida, se llevó a cabo un análisis del estado del arte para ubicar y definir los alcances del proyecto. Aspectos fundamentales como los modelos espaciales-temporales en SIG fueron estudiados para delimitar el estudio y enfocarse en la conceptualización, el planteamiento y finalmente en la implementación del modelo. Una vez delimitado el campo en donde el proyecto se establece, se eligió el modelo dinámico idóneo para los objetivos establecidos y así también se analizaron las herramientas computacionales que podrían proporcionar las características necesarias para la realización del proyecto.

En este sentido, el proyecto se planteó en tres etapas importantes. Las primeras dos corresponden al planteamiento del modelo espacial y el dinámico. La tercera etapa fue la implementación del modelo espacial-temporal, donde se llevo a cabo el análisis de caso un de estudio perteneciente a los sistema dinámicos discretos.

Al modelo se le denominó como GEOSDD “GeoSimulador de Sistemas Dinámicos Discretos”, donde el paradigma de modelado utilizado es el de Autómatas Celulares y para su implementación se construyó un SIG, donde las bases de datos espaciales tienen un rol importante. La motivación por la cual se define el modelo de esta manera se explica en próximas secciones, pero la razón principal del por qué se dispone de AC en SIG, es debido que así es posible definir simulaciones para cualquier sistema dinámico discreto en el cual se pueda aplicar AC y SIG como paradigmas de modelación.

1.2. Motivación

1.2.1. Reporte Towards 2020 Science

En el reporte “Towards 2020 Science: A Draft Roadmap” [Emmott, S., et al 2005], se señala que una de las metas para el 2020 es el surgimiento de una nueva ciencia, en donde sobresale el papel fundamental que tiene la *Ciencia de la Computación* para el desarrollo de la ciencias. En su vertiente de fundamento, se enfoca a los conceptos y teoremas que tratan con la dinámica discreta y reactiva.¹ La computadora, como instrumento de conocimiento, es la vertiente de experimentación “*Likely experimental mathematical*” y,

¹En particular, *los sistemas de biodiversidad*, son sistemas dinámicos muy interesantes donde el comportamiento con sus componentes espaciales-temporales, surgen como una nueva disciplina.

con las genéricas prescripciones de algoritmos y programas, se puede crear dinámica. Esto quiere decir, que no solamente es el análisis y escribir ecuaciones que capturen el fenómeno dinámico, como parte del modelado; sino que *computación construye la dinámica*.

De lo anterior, se desprende un primigenio desafío de la integración de computación, ciencias de la computación y las matemáticas; la cual se traduce hacia la integración de modelos, experimentación computacional y la teoría matemática-computacional. En consecuencia, en la investigación de nuevos modelos, el contexto se delimita a la estructura y fundamentación que será base al campo de aplicación.

La gama de aplicaciones en ciencias ambientales y ciencias sociales se llevará a cabo de la realización de una tecnología de *Sistemas Dinámicos Discretos Espacio-Temporales* los cuales son importantes por su impacto. Para poder lograr lo anterior se requiere que dichos sistemas representen fenómenos del mundo real, de tal forma que las aplicaciones sean llevadas a una cartografía. La representación geográfica se relaciona internamente con un modelo de datos, que se discuten brevemente en el tema de los sistemas de información geográficos. Pero dicha representación se debe ligar con el modelo estructural espacial-temporal relacionado a una fundamentación matemática-computacional. Delimitando modelos de Lotka-Volterra y/o difusión, con un enfoque de nueva propuesta de modelos discretos autómatas celulares, pueda ser evaluado en su problemática de escala, “lattices”: cuadrada, hexagonal y vicinidades: Moore y von Neumann. En la computación que construye la dinámica, consideramos la dinámica de autómatas celulares.

1.2.2. Modelado en Sistemas de Información Geográfica

El incremento exponencial de la potencia de los equipos informáticos ha posibilitado que en la actualidad no sólo sea factible trabajar con grandes volúmenes de datos alfanúmericos, sino que además también se les pueda asociar información sobre aspectos geográficos (espaciales) de los objetos a los que se refieren, de modo que, se pueda representar gráficamente sobre mapas o esquemas gráficos.

Los sistemas de información geográfica (SIG) tratan de dar un paso más sobre los sistemas de información tradicionales para pasar a ofrecer un entorno adecuado para la captura, almacenamiento y gestión tanto de información nominal como geográfica.

Un SIG es una tecnología basada en computadoras de propósitos generales que sirve para: almacenar, manejar y explotar datos geográficos en forma digital. Tiene un con-

junto de subsistemas enfocados hacia: la captura, el almacenamiento, el análisis, la visualización y graficación de diversos conjuntos de datos espaciales o geo-referenciados. Su fundamentación se basa en principios formales de: matemáticas discretas, modelos de datos espaciales-temporales y geometría computacional. Su desarrollo se basa principalmente en un núcleo de bases de datos geográficas con modelos de datos espaciales de raster y vectorial. Las tecnologías actuales incluyen el enfoque “Open Geographics Information System OGIS”, modelos objetos-relacional, bodegas de datos, interoperabilidad con metadatos catálogos y diccionarios. Nuevas tecnologías de la información son incorporadas mediante: estándares ISO/TC 211, ingeniería de software y tecnología Web-SIG. Su explotación y análisis de datos con: ambientes y lenguajes visuales, graficación y análisis geoestadístico de datos. En la actualidad se tienen amplias aplicaciones enfocadas al desarrollo sustentable, ecología, hidrología, urbanismo y planeación.

Características principales de los Sistemas de Información Geográfica

La característica principal de los SIG es el manejo de datos complejos basados en datos geométricos (coordenadas e información topológica) y datos de atributos (información nominal) la cual describe las propiedades de los objetos geométricos tales como punto, líneas y polígonos. La codificación de la información en datos apunta a estructuras y formatos adecuados para el almacenamiento en una base de datos, la cual podrá tener una descripción en un nivel de abstracción más alto con una base de metadatos.

Puesto que la característica principal de un SIG consiste en procesar información espacial, el primer componente a considerar debe ser un subsistema de entrada y salida de cartografía digital o información georeferenciada. La herramienta de adquisición de datos debe tener la capacidad de almacenar la información espacial-nominal compleja de la realidad en una base de datos; en donde, un compromiso principal es mantener la correctitud en el proceso y cuidar la validez de los datos en estructuras de almacenamiento físicas consistentes. En este sentido los metadatos llegan a tener una función predominante.

El núcleo de software de los SIG es el sistema manejador de base de datos que del inglés ha sido denominado DBMS “Data Base Management System”. Dicho sistema debe tener la capacidad para almacenar y gestionar las entidades asociando su representación geométrica y con su representación nominal constituida con atributos. La base para tener una independencia con la plataforma de implantación es el modelo lógico de datos que es una interfaz entre el modelo conceptual entidad-vínculo y el modelo físico donde se

almacenan las estructuras de datos y almacenamiento.

Los SIG contemplan herramientas de explotación de datos las cuales conlleva un sub-sistema de postprocesamiento de las consultas y resultados a través de reformato, tabulación, graficación y trazos de mapas. Para este último la representación gráfica implica el uso de herramienta para cartografía.

Comúnmente en un SIG: la consulta, el despliegue de un mapa, el reporte tabular y el gráfico, no es el resultado final. En su amplio abanico de aplicaciones los SIG tienen como un fuerte interés analizar la información espacial y modelar los procesos dinámicos que generan y conforman la información almacenada en una base de datos. Con frecuencia los usuarios quieren analizar situaciones, hacer inferencias o simular procesos, con el fin de tomar decisiones. El punto son los métodos de análisis espacial con métodos deterministas o estocásticos, tanto en sus modalidades discreta como continua.

De la amplia gama de posibilidades que tienen los SIG en el manejo de información, un requerimiento importante es brindar una interfaz de usuario amigable. En principio, podemos mencionar que existe una extensión de SQL a GSQL. Los lenguajes o ambientes visuales para bases de datos ha sido una área relativamente reciente en computación la cual tomó una importancia especial en los SIG por la naturaleza visual-espacial que tiene la información geográfica.

1.3. Planteamiento del problema

En el modelado para la simulación de sistemas dinámicos discretos, uno de los modelos comúnmente usados son los Autómatas Celulares (AC). Múltiples trabajos de investigación han demostrado los AC son capaces de representar los procesos dinámicos en detalle y de una manera realista. Además, la representación celular del espacio hace más fácil la combinación de AC con sistemas SIG. De esta manera, el modelo puede proveer información rica en detalles.

La investigación propuesta en esta tesis tuvo como objetivos plantear de un modelo de este tipo, su implementación y a su vez proponer soluciones a una serie de dificultades:

- **Resolución Geográfica.** Debido a la necesidad de un modelo de simulación genérico, se debe involucrar una amplia gama de procesos. Esto implica que se requiere un número indeterminado de resoluciones espaciales para simular un proceso dinámico. Los modelos con base en AC ya ofrecen una forma de abordar el problema de la

resolución que abarca desde celdas que cubren pequeñas regiones hasta mapas completos. ¿Qué otras posibilidades existen para tratar con combinaciones de escalas espaciales?

- **Escalas de tiempo.** Existen procesos dinámicos que requieren actualizaciones a cierto determinado tiempo, sea corto o largo. Es necesario considerar la recopilación de los datos para el modelo es aceptable o no, porque de eso depende de la escala y el tiempo de evolución en los procesos.
- **Representación Espacial.** No solo es el la resolución de los datos espaciales, también es la características de la representación de los datos. Una ventaja del modelado en AC es su adaptación de su paradigma a diferentes representaciones espaciales. Pero, ¿Cuántos tipos de representación de datos son necesarios para un modelo genérico de simulación?
- **Incertidumbre.** El soporte de decisiones requiere certeza, ¿es deseable desarrollar un sistema que proporcione respuesta verdaderas y claras?, ¿como se comparan los resultado?. Es claro que la dinámico de los procesos está lleno de incertidumbre, incluso si sabemos todo los que hay que saber, todavía no seremos capaces de predecir con completa exactitud el comportamiento de un sistema dinámico.
- **Reconocimiento y comparación de los resultado geográficos.** La inclusión de un método de análisis y comparación de resultados en un modelo es crucial. La observación visual de los resultados puede detectar diferencias, pero que pasa cuando los resultados son muy similares, qué los hace diferentes. Un buen planteamiento del modelo espacial juega un rol importante en este apartado, ya sea para la validación o calibración del modelo. Sin embargo, solo una comparación visual no es aceptable.
- **Reglas de transición.** En un modelo de AC, las reglas de transición describen cómo el estado de una de las celdas cambiará con el tiempo según la información local. La gran cantidad de combinaciones de reglas que se pueden generar es impresionante, pero al mismo tiempo la selección del conjunto correcto de reglas es una parte crítica en el desarrollo del modelo. Encontrar un conjunto adecuado de reglas de transición es un procedimiento tedioso que requiere mucho tiempo del constructor del modelo. La cuestión es como un modelo espacio-temporal genérico responde a la recibir de entrada un número indeterminado de reglas y variables.

- **Implementación.** Las características del modelo plantea retos en su implementación, la validación del modelo es a través de esta misma. Llevar a cabo una selección de los herramientas computacionales de desarrollo para el SIG y funciones que describirán al modelo es crucial.

1.4. Propuesta de la tesis: Objetivos

Esta tesis propone utilizar Autómatas Celulares en conjunción con Sistemas de Información Geográfica para un modelo de simulación en sistema dinámicos discretos que permita modelar y simular procesos dinámicos en un entorno espacial-temporal geográfico. Esto implica la creación de un sistema computarizado que valide el modelo a través de análisis de un caso de estudio, mismo que se describe en próximos capítulos.

Por lo tanto, este trabajo presenta lo siguientes objetivos:

- Análisis de los modelos espaciales actuales con base a AC en sistemas de información geográfica.
- Delimitación de los sistemas dinámicos discretos para el modelo donde el paradigma de AC juegue un rol importante en la simulación de sus procesos dinámicos.
- Definición de un modelo espacial donde sea definida un cierto de representación de los datos en el espacio, modificando la cuadrícula tradicional de un AC.
- Construir el modelo dinámico con base a un AC capaz de recibir diferentes representaciones espaciales y reglas de transición. La correlación entre el modelo espacial y el dinámico son muy estrechos, dados que ambos se complementan.
- Desarrollar un sistema computacional que describa el modelo espacial y dinámico. Además, el sistema podrá simular un caso de estudio, comparar y validar los resultados mediante métodos de análisis espacial. Finalmente, se pretende que el sistema pueda ser el marco de referencia para el inicio de desarrollo de un sistema más sofisticado que añada más modelos espaciales, como ejemplo sistemas multi-agentes.

1.5. Descripción del documento

Como se mencionó anteriormente, el trabajo se dividió en tres partes principales: modelo espacial, modelo dinámico e implementación del modelo. A continuación se describen brevemente el contenido de cada capítulo de la tesis.

- En el capítulo 1, se presenta una introducción al tema, antecedentes, la línea de investigación y descripción general del problema que motivaron al estudio de este trabajo.
- En el capítulo 2, se presenta antecedentes de los SIG y conceptos que introducen a las capacidades de estos sistemas como herramientas de modelado.
- En el capítulo 3, se describe el análisis de los modelos espaciales utilizados comúnmente en la simulación de procesos dinámicos discretos.
- El capítulo 4 describe el modelo espacial, hace énfasis en la transformación de los datos espaciales, para obtener representaciones geométricas adecuadas para la aplicación de AC. A su vez, introduce los dos tipos de datos espaciales utilizados SIG. Se introduce el concepto de la teselaciones (representaciones geométricas) y propone el uso de la base de datos espacial como núcleo de las funciones espaciales descritas por el modelo.
- En el capítulo 5, se presenta la definición de un AC y se describe las funciones definidas para el modelo de simulación.
- El capítulo 6 contiene la implementación del modelo GEOSDD en un SIG, y presenta el análisis de un caso de estudio.
- Finalmente, el capítulo 7 presenta las conclusiones y trabajo futuro del trabajo de investigación.

Capítulo 2

Sistemas de Información Geográfica

2.1. Antecedentes

La ruta histórica de los *Sistemas de Información Geográficos*, que por sus siglas en inglés se denominan *GIS*, inicia en la década de 1960 (cf. [Burrough y McDonnell, 1998]),¹ con una mayor desarrollo en la década de 1970 por la ayuda de las computadoras del tipo “mainframes” como: IBM 370, CDC 3100, HP 3000, CDC Cyber 74, PDP-10, entre otras². Durante los 1960’s y 1970’s se iniciaron nuevas tendencias en donde los datos acerca de los recursos naturales, del suelo y los sistemas de panorama empezaron ha ser usados para: el gravamen de los recursos, evaluación de la tierra y la planeación y uso del suelo. De esta manera, la tecnología de la computación subraya la automatización de los SIG, sus principios y ciencia dieron pie a modelos espaciales geográficos de los SIG.

En una temprana referencia “*Automated Geographic Information Systems an Landsat Data: A Survey*” los autores Ellen M. Knapp y Deborah Rider asociados al Computer Science Corporation y Earth Resources Branch, describen un panorama de la automatización SIG para asistir a los programas de transferencia de tecnología Landsat y soporte a los proyectos de investigación del mismo. En dicho artículo los autores mencionan “el análisis complejo de los recursos naturales y la planeación del uso de la tierra han tenido sus expeditos avances con la tecnología de computación en la colección automatizada,

¹Los aspectos históricos de los SIG son tratados en gran detalle por Foresman TW (ed) (1998) *The historical of Geographic Information Systems: perspectives from the pioneers* [Foresman TW, 1998]

²El lector puede recurrir al artículo “*Automated Geographic Information Systems an Landsat Data: A Survey*”, Ellen M. Knapp y Deborah, donde expone un cuadro sumario de los sistemas de computadoras y organizaciones en contra de los estándares de las categorías y características.

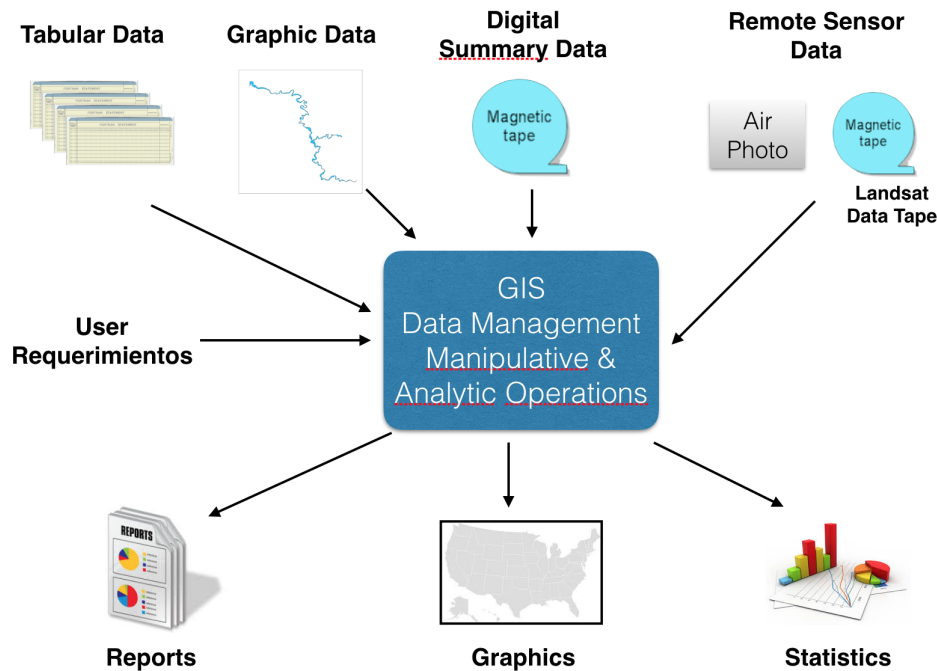


Figura 2.1: Esquema de Un GIS (por sus siglas en inglés como sistema automatizado de información geográfica y datos del LANDSAT, cuyos autores son Ellen M. Knapp y Deborah Rider.

almacenamiento, recuperación, manipulación, y despliegado de datos espaciales o datos geográficamente referenciados” (En la figura 2.1 mostramos una réplica de como se esquematizaba un SIG en el artículo referido). De esta manera, con el inicio de la automatización de los SIG, los sectores públicos y privados, con la información en curso de los recursos naturales y del uso de suelo, se permitieron mayores análisis de información interrelacionada con la perspectiva de ayuda a la toma de decisiones.

En los Estados Unidos de América arquitectos de paisaje empezaron a tomar datos de algunas fuentes de recursos, para ser sobrepuestos en cuadros de datos de manera trasparente en mapas, observando fronteras en donde deberá de coincidir, donde uno de los mayores exponentes fue el arquitecto de paisaje Ian L. McHarg [McHarg, 1971]. En este orden de disciplinas apareció SYMAP como el programa de Howard T. Fisher arquitecto americano planificador de ciudades [Fisher, H. T. 1970]. El Laboratorio de Graficación por Computadora y Análisis Espacial de la Escuela de Graduados de Harvard de Diseño, fue la pionera en el desarrollo de métodos y programas para la producción de mapas por computadora mediante el despliegado de información cuantitativa y cualitativa

con referencia particular al trabajo de planificación. Tomando en cuenta las ideas de Edgar M. Horwood de usar la computadora de hacer mapas simples por imprimir valores estadísticos en una malla sobre papel llano, Fisher crea el programa SYMAP, acrónimo de *Synagraphic MAPping* (el nombre tiene el origen en la palabra griega *synagein* que significa llevar junto). El sistema fue uno de los tempranos ejemplos significativos de graficación por computadora, por analizar datos y producir corografía o interpolaciones de isolíneas, resultados que se producían en impresoras de matriz sobre imprimiendo caracteres en una línea de impresión para producir una adecuada escala de grises (ver fig. 2.2). El programa Symap fue un sistema muy exitoso como uno de los más completos, sofisticado y flexible programa de mapeo. Con Symap estudios de contaminación del aire ayudaron a su mapeo por computadora, mediante éste programa se tuvo el uso de graficación por computadora para claramente retratar datos relacionados a la fuente, distribución, y efectos en la comunidad de la contaminación del aire.



Figura 2.2: Ejemplo de graficación del sistema SYMAP

De esta manera, a partir de los años de 1970's los Sistemas de Información Geográfica siguieron una trayectoria de mayor automatización llevada por el crecimiento tecnológico

de la computación.

2.1.1. Captura de datos, administración de datos y tecnología de base de datos

Los SIG representaron ser en computación un tema muy importante por la vasta información que empezó a reunir (gráfica, tabular y remotamente detectada), la cual debía de ser coleccionada, almacenada y analizada, para que interrelacionada pudiera ser entendida en el contexto de un modelo. Dichos modelos debían de ser examinados con procesos físicos y espaciales que proporcionaran resultados gráficos y tabulares mejorando el tiempo y costo menor [Kennedy y Meyers, 1977] y [Cowen, 1978].

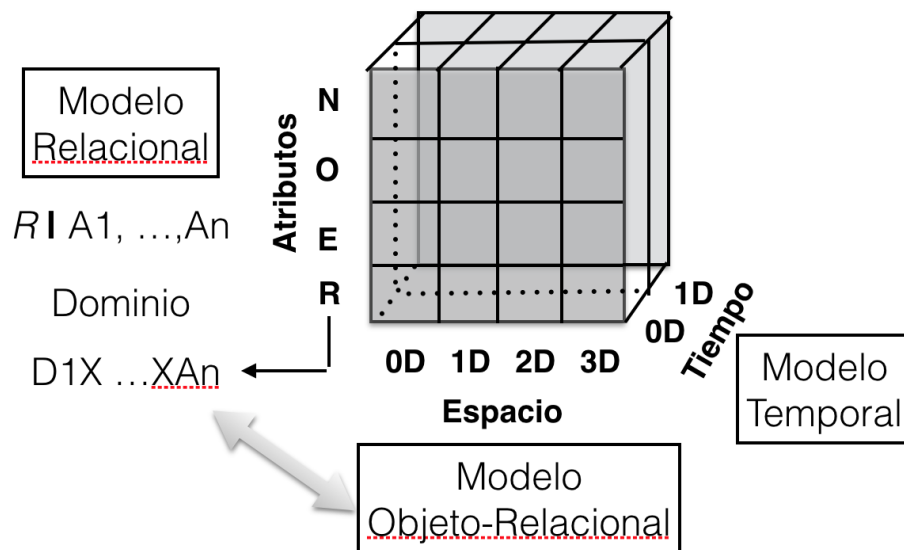


Figura 2.3: Cubo multidimensional del espacio, tiempo y atributos, donde cada tema apunta a un modelo de base de datos (adaptado de [Harrower, 1999]:14 y [Ott y Swiaczny]:4

En esta década por los SIG se tuvo un gran incremento de tipos de datos que debieron ser coleccionados y convertidos en formato digital, de tal forma que propició a la extensión digital geográfica orientada a las *bases de datos espaciales*. En consecuencia, en los años 70's del siglo anterior los sistemas automatizados de información espacial empiezan a ser usados para incluir subsistemas de almacenaje, recuperación, manipulación, análisis y desplegado [Tom y Miller, 1974], [Power, 1975] y [IGU, 1976].

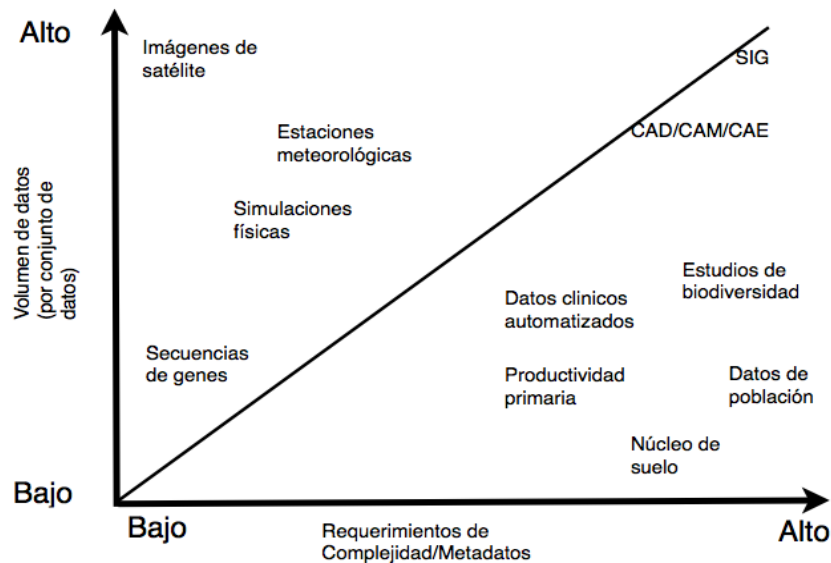


Figura 2.4: Gráfica de relación entre el volumen de datos y su complejidad.

La decodificación de datos y procesamiento de entrada desde el surgimiento de los SIG fue uno de los problemas principales por atender, de como la información relevante para cada tipo de dato deberá ser obtenida, considerando la exactitud, la precisión y las características espaciales de los datos (por ejemplo, sistema georeferenciado, escala) [Salmen et al. 1977b] y [Kennedy y Mayers, 1977]. Los involucrados en el SIG acerca de la captura de datos y la conversión son cubiertos por Hohl P. (ed) conversión de datos en GIS [Hohl, P. 1998]. De esta forma los tipos de datos espaciales para ser referidos como una capa de datos espaciales, donde cada capa de datos espaciales se tienen cuatro tipo de entidades geográficas representadas como puntos, líneas y polígonos. En este punto es cuando se hace referencia al uso de una malla de celdas como un identificador de localización donde las entidades podrán ser generalizadas y almacenadas. La retícula de celdas puede estar constituida de celdas de área regular, celdas irregulares, celdas triangulares irregulares, o alguna otra representación de malla [Peucker y Chrisman, 1975], [Males, 1977] y [Gold, 1977].

De lo anterior, se desprende que la gestión-administración de datos relacionados a las entidades espaciales es muy compleja, tanto por el soporte de sus múltiples aplicaciones como el nuevo modelo de datos que apuntan a un modelo orientado a objetos (ver figura 2.3). De esta forma, las bases de datos geográficas contarán con un gran volumen de

datos y una mayor diversidad de datos complejos como puede observarse en la figura 2.4. Los SIG contendrán una base de datos geográfica caracterizada por una toponimia y una georeferencia geográfica espacial, lo cual determina nuevos dominios de datos que caracterizan a las entidades nominalmente y espacialmente referidas a un sistema de referencia relativo a diferentes proyecciones de mapa y sistema de referencia geodésico [Richardus, P. y Adler, R. K. 1972], [Bugayevskiy, L. M. y Snayder, J. P. 1995], [Pearson, F. 1990]. La especificación de bases de datos geográficas se discute en el libro de Adam N. R. y Gangopadhyay en [Adam y Gangopadhyay 1997] y en el libro [Goodchild, M. F. 1989].

La construcción de una base de datos geográfica implica un proceso de abstracción para pasar de la complejidad del mundo real a una representación simplificada que pueda ser procesada por el lenguaje de las computadoras actuales. Este proceso de abstracción tiene diversos niveles y normalmente comienza con la concepción de la estructura de la base de datos, generalmente en capas; en esta fase, y dependiendo de la utilidad que se vaya a dar a la información a compilar, se seleccionan las capas temáticas a incluir. La estructuración de la información espacial procedente del mundo real en capas con lleva cierto nivel de dificultad. En primer lugar, la necesidad de abstracción que requieren los computadores implica trabajar con primitivas básicas de dibujo, de tal forma que toda la complejidad de la realidad ha de ser reducida a puntos, líneas o polígonos, objetos que requieren estructuras de datos.

2.1.2. Estructuras de datos y algoritmos, topología y base de datos espaciales

Una valiosa contribución a los SIG fueron las estructuras de datos y los algoritmos de los objetos geométricos [Peucker y Chrisman 1975], [Mitchell 1977], [Chrisman 1977]. Los polígonos pueden ser definidos en alguna de las tres estructuras de datos: estructura de archivo *Dual Independent Map Encoding (DIME)*, estructura completa de polígono, estructura de línea y estructura de punto (ver figuras 2.5 y 2.6); considerando que las estructuras de almacenajes de datos pueden incorporar o no pueden incorporar relaciones topológicas como es la posición de una entidad con respecto a sus entidades vecinas. Las ventajas y desventajas de una malla versus estructura de coordenadas (x,y) fueron discutidas en [Peucker 1972], [Durfee 1974] y [Kennedy y Mayers 1977].

En general, el análisis de datos de múltiples capas de datos espaciales requieren de

técnicas de procesamiento (algoritmos), adecuadas para el tratamiento de mallas y estructura de coordenadas x,y , tomando en consideración la conversión de una estructura hacia otra: [Peuquet 1977]; [Marble y Peuquet 1977] y [Cicone 1977]. Además, las funciones de procesamiento deberán proporcionar operaciones para la manipulación y análisis tales como: rotación, translación, y escala de coordenadas; conversión de coordenadas geográficas a una proyección de mapa específica. En los SIG el análisis espacial deberá incluir:

1. Capacidades de sobreposición en mallas y archivos de coordenadas (x,y) .
2. Búsquedas con operaciones de proximidad y cercanía.
3. Análisis topográfico: cálculo de pendientes, aspectos, visibilidad de puntos o características lineales, selección de rutas.
4. Conglomerado espacial o agregación.
5. Tipos de vecindad y adyacencia.

En los SIG la incorporación de los conceptos de topología digital han sido fundamentados por los trabajos de Rosenfeld y sus discípulos en la Universidad de Maryland: [Kong, T.Y. y Rosenfeld 1989] y [Kong, T.Y. et al. 92]. El universo de puntos digitales es el conjunto de puntos con coordenadas enteras en Z^n , en este espacio se definen regiones Σ ventanas (o recuadros) de puntos digitales que se denominan puntos digitales o pixeles, voxel, n-xel, etc. En este espacio es posible definir una distancia d de tal forma que se puede construir un espacio métrico (Σ, d) . Con esta definición podemos construir una topología con conceptos de cercanía, vecindad y adyacencia.

2.1.3. Análisis espacial y estadística geográfica

De los años de 1960 a 1970 la computación y la situación de datos espaciales difiere enormemente al estado del arte de las herramientas de análisis cuantitativo y el estado de la tecnología en computación. En la revolución que ha tenido los SIG es la generación de una vasta cantidad de información espacial y relevante información geográfica. Los progresos que se tienen en la básica información digital de mapas manejada tecnológicamente ha dejado atrás lejos la capacidad de los geógrafos de hacer mucho que sea nuevo, creativo o conceptualmente en bases de datos. Por otro lado, el enriquecimiento de los datos inducidos por los SIG pone el acento en generalizar procesos y patrones, tales como

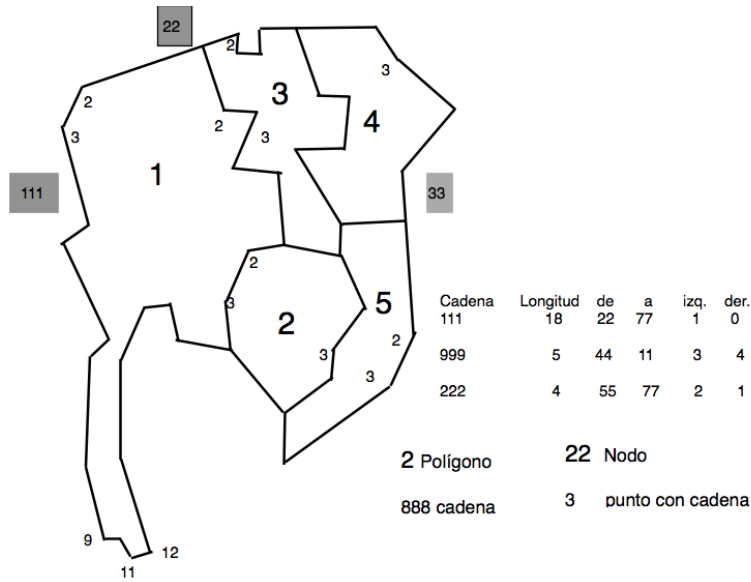


Figura 2.5: Mapa de red topológica del clásico sistema POLYVRT para manejar información geográfica. Desarrollado por Nicholas Chrisman en el Laboratory of Computer Graphics and Spacial Analysis de la Universidad de Harvard [Peucker 1975]. Se describen la representación externa de estructuras de datos: 1) Polígonos y nodos 2) Nodos y coordenadas geográficas.

sintetizar nuevos conceptos relacionados a las bases de datos espaciales. De esta forma, en los años de 1990 un desafío fue ensayar y descubrir como llevar a cabo e identificar formas en poder llenar los espacios entre los lados teóricos y empíricos para el desarrollo de la geografía y los SIG. Los Sistemas de Información Geográfica ha incorporado cada vez más componentes principales el de análisis espacial y estadística espacial, cuyas técnicas y algoritmos aplicados han sido puestos y ahora explicados en una serie de libros como: [Chou Y,H. 1996], [Fischer, M.M. y Unwin, D. 1996] y [Fotheringham, 2000]. La computación de alto rendimiento HPC y computación paralela resultan ser los medios tecnológicos hacia una conceptualización basada en el paradigma de análisis espacial en el artículo de S. Openshaw *A concepts-rich approach to spatial analysis, theory generation, and scientific discovery in GIS using massively parallel computing* en [Worboys, M. F. 1994].

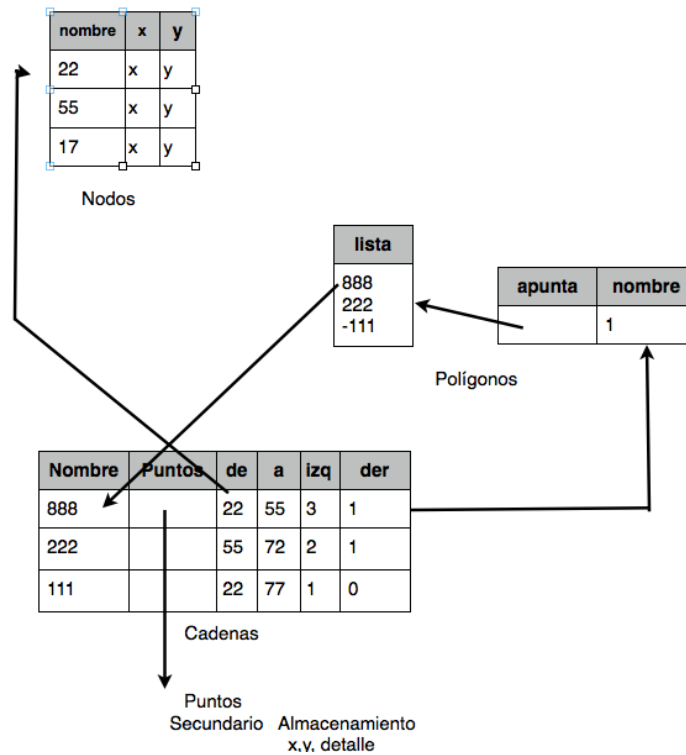


Figura 2.6: Mapa de red topológica del clásico sistema POLYVRT para manejar información geográfica. Desarrollado por Nicholas Chrisman en el Laboratory of Computer Graphics and Spatial Analysis de la Universidad de Harvard [Peucker 1975]. Se describen la representación interna de estructuras de datos: 1) Polígonos y nodos 2) Nodos y coordenadas geográficas

2.1.4. Visualización y “queries” dinámicas

En muchos, si no es que en la mayoría de los sistemas manejadores de base de datos, se requiere que los usuarios finales formulen sus consultas complejas, con la presunción que ellos, no necesariamente están familiarizados con la subyacente estructura de la base de datos. Una consulta en la base de datos se expresa usando un lenguaje de alto nivel como SQL. Sin embargo, la necesidad de tener un nivel conceptual y declarativo de mayor nivel a llevado al desarrollo de nuevos lenguajes de consulta. El compromiso se tiene entre la funcionalidad y las capacidades de la interfaz para la mayor usabilidad posible, en una tendencia de desarrollo de los lenguajes de consulta.

El objetivo de tener un mayor nivel conceptual, una interfaz flexible y amigable, permitiría los usuarios finales construir consultas complejas. Si contamos con usuarios expertos

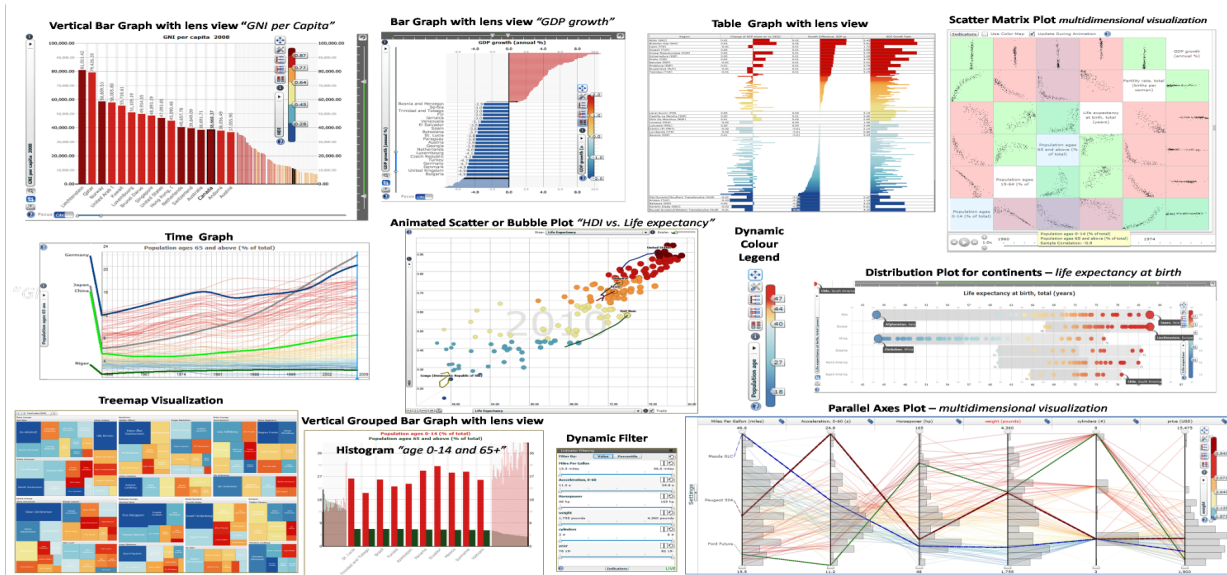


Figura 2.7: Mdim eXplorer incluye una colección de métodos interactivos como consultas dinámicas que permiten visualizar información y llevar a cabo análisis visual, especialmente a los requerimientos de muchos datos temporales y multivariados. La características dinámicas son importantes para la visualización analítica de los datos.

en bases de datos, ellos podrán encontrar más resultados en menor tiempo. Por otro lado, si tenemos solo expertos en la disciplina de aplicación, ellos se dedicarán a pensar en el problema de alto nivel y, concentrarse principalmente en la exploración de datos, con la finalidad de probar su hipótesis. Podemos resumir, que el punto de los problemas de aplicación, el interés es la interacción más flexible y dinámica con la base de datos, de tal forma que se puedan visualizar los datos de manera experimental.

El tema de *consultas dinámicas* fueron concebidas originalmente como una técnica de visualización para grandes bases de datos, procurando ampliar las aplicaciones, en especial las científicas. Las consultas dinámicas permiten a los usuarios especificar cierta selección de criterios que de manera continua y en orden podemos ver como los datos satisfacen los criterios de cambio. Las consultas dinámicas no son pre-procesadas, sino que tienen la facultad de hacer cambios en tiempo de ejecución. De esta forma los sistemas de consultas dinámicas son una capa entre el modulo de consulta a la base de datos y la visualización de datos, representando una valiosa herramienta para extraer y presentar información de manera dinámica.

Las consultas dinámicas son representadas mediante un número de *“widgets”* tales



Figura 2.8: En el sistema de consulta *Dynamic HomeFinder* cada punto satisface la consulta descrita por los cursores para localización, costo, tipo de casa, etc. Los puntos iluminados pueden ser seleccionados para generar una descripción detallada [Ahlberg1992].

como un “slider” cursor o “botones”. Un cursor puede tener una etiqueta con el campo indicando el valor corriente, una barra de cursor con una caja de arrastre “drag box” y el valor al final de cada cursor para indicar el mínimo y el máximo de los valores. Cuando uno arrastra la caja usa el ratón, con la posibilidad de cambiar los valores del cursor. La interacción entre el mecanismo de las consultas dinámicas y la interfaz de visualización de la base de datos es muy importante (ver figura 2.7).

Un excelente ejemplo de sistema de consulta dinámica es el *HomeFinder*, propuesto Williamson y Shneiderman en 1992. En él se despliegan mapas geográficos en páginas Web donde se despliegan las localizaciones de casas en venta, todos los datos en el mapa: número de casas, especificación de casas, son mapeadas en la base de datos. La página Web contiene cursores (en el lado derecho de la figura 2.8), de tal forma que si uno mueve los cursores entre el mínimo y máximo también cambian los criterios de selección. Las consultas dinámicas pueden permitir una rápida identificación del tipo de casa que se desea, costo, lugar, áreas en las que se cubre, etc.; con el movimiento de los cursores se cambia la consulta, representando un buen ejemplo de consulta dinámica.

La tecnología de consultas dinámicas constituyen un importante componente para

bases de datos gráficas pudiendo orientarse a una gran cantidad de aplicaciones. La combinación del “front end” y la consulta dinámica da como resultado una de las deseables mejores interfaces de bases de datos. El punto, son consultas gráficas, que se ubican en el límite de la visualización y la gama de consultas tradicionales. Dicha combinación puede también proporcionar una representación gráfica de las bases de datos del resultado de las consultas, mientras se empiezan a aprovechar la inmediata retroalimentación de los resultados después de cualquier ajuste de la consulta. Finalmente, con una interfaz gráfica eslabonamos consultas dinámicas con potencialidades de una alta funcionalidad.

Las consultas dinámicas representa una excelente tecnología para la exploración y visualización de datos en bases de datos científicas biológicas. Es una tecnología ubicua donde las bases de datos se ubican en las redes microbiológicas amplias. Para las consultas taxonómicas resulta muy significativa debido a que podemos dinámicamente consultar a través de dendrogramas, y podemos desplegar vídeos de cepas en macro donde se muestre el comportamiento.

2.2. Proyectos de Sistemas de Información Geográfica

La tecnología de un SIG está basada en computadoras de propósitos generales que sirve para: almacenar, manejar y explotar datos geográficos en forma digital. Tiene un conjunto de subsistemas enfocados hacia: la captura, el almacenamiento, el análisis, la visualización y graficación de diversos conjuntos de datos espaciales o geo-referenciados. Su fundamentación se basa en principios formales de: matemáticas discretas, modelos de datos espaciales-temporales, geometría computacional y estadística. Su desarrollo se basa principalmente en un núcleo de bases de datos espaciales-geográficas con modelos de datos espaciales de raster y vectorial. Las tecnologías actuales incluyen el enfoque “Open Geographics Information System” (OGIS), modelos objetos-relacional, bodegas de datos, interoperabilidad con metadatos catálogos y diccionarios. Nuevas tecnologías de la información son incorporadas mediante: estándares ISO/TC 211, ingeniería de software y tecnología Web-SIG. Su explotación y análisis de datos con: ambientes y lenguajes visuales, graficación y análisis geoestadístico de datos. En la actualidad se tienen amplias aplicaciones enfocadas: al desarrollo sustentable, la ecología, la hidrología, el urbanismo y la planeación regional, la sociología, el monitoreo ambiental y geografía física.

De lo anterior se desprende que una implementación exitosa de un proyecto SIG requiere de una cuidadosa planificación la cual depende de un cierto número de decisiones, que se llevan a cabo dentro de la conceptualización, el desarrollo con la ingeniería de software y la implementación con la tecnología de la computación. En la administración de un proyecto, el lector podrá evitar típicas fallas mediante las referencias que se tienen en las guías de consulta y procedimientos descritos en [Aronoff, S. 1989], [Huxhold, W.E. y Levinsohn, A.G. 1995] y [Korte, G. B., 1997].

2.2.1. Características principales de los Sistemas de Información Geográfica

Puesto que la característica principal de un SIG consiste en procesar información espacial, el primer componente a considerar debe ser un subsistema de entrada y salida de cartografía digital o información georeferenciada. La herramienta de adquisición de datos debe tener la capacidad de almacenar la información espacial-nominal compleja de la realidad en una base de datos; en donde, un compromiso principal es mantener la correctitud en el proceso y cuidar la validez de los datos en estructuras de almacenamiento físicas consistentes. En este sentido los metadatos llegan a tener una función predominante.

El núcleo de software de los SIG es el sistema manejador de base de datos que del inglés ha sido denominado *DBMS "Data Base Management System"*. Dicho sistema debe tener la capacidad para almacenar y gestionar las entidades asociando su representación geométrica y con su representación nominal constituida con atributos. La base para tener una independencia con la plataforma de implantación es el modelo lógico de datos que es una interfaz entre el modelo conceptual entidad-vínculo y el modelo físico donde se almacenan las estructuras de datos y almacenamiento.

Los SIG contemplan herramientas de explotación de datos las cuales conlleva un subsistema de postprocesamiento de las consultas y resultados a través de reformateo, tabulación, graficación y trazos de mapas. Para este último, la representación gráfica implica el uso de herramienta para cartografía.

Comúnmente en un SIG: la consulta, el despliegue de un mapa, el reporte tabular y el gráfico, no es el resultado final. En su amplio abanico de aplicaciones los SIG tienen como un fuerte interés analizar la información espacial y modelar los procesos dinámicos que generan y conforman la información almacenada en una base de datos. Con frecuencia los usuarios quieren analizar situaciones, hacer inferencias o simular procesos, con el fin de

tomar decisiones. El punto son los métodos de análisis espacial con métodos deterministas o estocásticos, tanto en su modalidad discreta como continua.

De la amplia gama de posibilidades que tienen los SIG en el manejo de información, un requerimiento importante es brindar una interfaz de usuario amigable. En principio, podemos mencionar que existe una extensión de SQL a GSQL. Los lenguajes o ambientes visuales para bases de datos ha sido una área relativamente reciente en computación la cual tomó una importancia especial en los SIG por la naturaleza visual-espacial que tiene la información geográfica.

2.2.2. OpenGIS y metadatos

Los datos geográficos son los que describen directamente o indirectamente fenómenos asociados a una localización (tiempo y orientación) relativos a la superficie de la tierra [Buehler K. y McKee, L. 1996]. Prácticamente, tenemos cerca de 50 años de coleccionar información digital mediante diferentes medios, sobre todo cuando el avance de la tecnología ha permitido a una gran cantidad de empresas privadas coleccionar información con satélites de alta resolución, sistemas de imágenes, sistemas de posicionamiento global y sistemas de sensores para ambientes ecológicos.

Durante estos años mediante diferentes métodos se han adquirido, almacenado, procesado, analizado y visualizado geodatos de manera independiente o conjunta en sistema que requieren de diferentes fuentes de información. La visión del Open GIS Consortium (OGC) es promover y ofrecer tecnología de estandarización para la completa integración de datos espaciales y los recursos de geoprocésamiento dentro de la corriente principal de la computación y el amplio uso de interoperabilidad, software de geoprocésamiento comercial sistemas sustentados de la más infraestructura de la información disponible.

La información incluye distintas fuentes y formatos en una completa gama de datos geográficos digitales:

1. **Mapas digitales.** En estos se incluyen regiones en temas tales como: tipo de suelo, uso de suelo, fronteras políticas, regiones de promedio de ingreso familiar, áreas geoestadísticas básicas AGEB's, y otras entidades acotadas , que son las que están representadas en regiones acotadas por vectores (polígonos).

Capítulo 3

Modelos y simulación geográfica

3.1. Clasificación de modelos

Hay tres categorías de modelos espaciales con respecto al grado de formalización; escala, conceptual y modelos matemáticos [Fedra 1993]. Los modelos de escala son representaciones de las características físicas del mundo real como los modelos digitales de terreno o modelos de redes de sistemas hidrológicos. Los modelos conceptuales usan el lenguaje natural o diagramas de flujo para esbozar los componentes de un sistema bajo investigación y destacar las relaciones entre ellos. Los modelos matemáticos ponen en prácticas los modelos conceptuales para representar sus componentes e interacciones con construcciones matemáticas. Los modelos matemáticos pueden utilizar modelos de escala para representar su información.

Otra importante clasificación de los modelos espaciales es como ellos interactúan con los fenómenos indeterminísticos del mundo real [Berry 1995]. Los modelos determinísticos generan soluciones repetibles basados en evaluaciones directas de relaciones definidas., es decir, carecen de la presencia de variables aleatorias. Los modelos probabilísticos están basados en distribuciones de probabilidad de eventos estadísticos independientes y generan un rango de soluciones posibles. Los modelos estocásticos son modelos probabilísticos con distribuciones de probabilidad condicionadas a tomar en cuenta el tiempo y espacio.

Una tercera clasificación se refiere a estáticos/dinámicos. En un modelo estático todos los valores tienen la misma etiqueta, es decir, solo un punto en el tiempo es considerado. Los modelos dinámicos están usualmente asociados a la noción de un estado constante o equilibrio. En un modelo dinámico, los valores tienen dos o más etiquetas de tiempo,

por lo tanto, en el proceso de cambio se modelan. Los modelos dinámicos pueden ver al tiempo como continuo o discreto. Modelos con intervalos de tiempo discreto son llamados modelos de simulación; con intervalos de tiempo fijo (periodos) son llamados recursivos; con intervalos de tiempo variable son llamados por eventos.

Modelos espaciales pueden ser clasificados acorde a sus resolución en el espacio, tiempo y atributos, rangos desde microscópicos a macroscópicos. La dimensión del espacio puede ser representado por objetos con dimensión cero (puntos), una dimensión (líneas), dos dimensiones (áreas) o tres dimensiones (volúmenes). El tamaño de los objetos pueden variar desde unos pocos metros a cientos de kilómetros. En términos similares, la dimensión del tiempo puede ser representado con dimensión cero (evento) o una dimensión (proceso); la resolución varía entre unos pocos segundos a cientos de años. La dimensión del atributo puede representarse como simple o multi-atributo. La resolución puede variar desde objetos individuales (moléculas, neuronas, viajeros) descritos por una lista de atributos a grandes colectivos (gases, especies, economías nacionales) descritos por promedios de atributos, con todas las etapas intermedias. Los modelos de simulación de objetos individuales son llamados modelos de micro-simulación; modelos de micro-simulación no necesitan simular todos los objetos de el sistema de investigación pero puede trabajar con un ejemplo suficientemente grande [Stewart 2000].

Hay muchas más maneras de clasificar modelos espaciales. Pero más allá de los anterior, los modelos espaciales pueden ser clasificados como:

1. *Exhaustivos*: Algunos modelos tratan solamente con un subsistema espacial, mientras que otros tratan con interacciones entre diferentes subsistemas espaciales.
2. *Modelo estructural*: Un grupo de modelos aplica solo un principio único y unificador para modelar y enlazar todos los subsistemas; otros modelos constan de submodelos débilmente acoplados cada uno de los cuales tiene su propia estructura interna independiente.
3. *Fundamentos teóricos*: Modelos ambientales se basan en la leyes físicas, mientras modelos socioeconómicos aplican enfoques teóricos tales como la utilidad aleatoria o teoría del equilibrio económico.
4. *Técnicas de modelado*: Aquí las técnicas de modelado como los modelos de entrada y salida, modelos de interacción espacial, modelos de redes neuronales, modelos de Markov o micro-simulación pueden ser listados.

3.2. Modelos espaciales y SIG

La utilidad de un SIG radica en su capacidad para elaborar modelos, es decir, construir modelos del mundo real a partir de las bases de datos digitales y utilizar esos modelos para simular el efecto de un proceso específico en el tiempo para un determinado escenario. La construcción de modelos constituye un instrumento muy eficaz para analizar las tendencias y determinar los factores que influyen en ellas.

Una pieza importante en el desarrollo de estos modelos de simulación, es el análisis espacial, el cual incluye un conjunto de herramientas de análisis estadístico para abordar aquellos casos en los que la distribución espacial de los datos tiene influencia sobre las variables medidas.

3.3. Sistemas dinámicos y modelos temporales

Existen varios tipos de modelos se adoptan para llevar a cabo simulaciones en SIG's, cada uno con ventajas y desventajas, o bien, utilizados de manera combinada para resolver un problema en común. A continuación se describen algunos de los modelos más importantes en el ámbito de simulaciones.

3.3.1. Modelos basados en Ecuaciones Diferenciales Parciales

Una ecuación en derivadas parciales (EDP) es una relación entre una función matemática u de varias variables independientes x, y, z, t, \dots y las derivadas parciales de u respecto de esas variables. Las EDP se emplean en la formulación matemática de procesos de la física y otras ciencias que suelen estar distribuidos en el espacio y el tiempo. Problemas típicos son la propagación del sonido o del calor, la electrostática, la electrodinámica, la dinámica de fluidos, la elasticidad, la mecánica cuántica.

La modelos de simulación basados en EDP generalmente son utilizados para describir procesos matemáticos, y usualmente usados para realizar análisis y simulaciones por computadora de fenómenos físicos continuos en los campos de mecánica, la electrostática, la electrodinámica y la acústica.

Sin embargo, desde hace varios años, ha crecido la tendencia en aplicarse este tipo modelos sobre SIG's, para encontrar elementos claves en procesos espaciales, principalmente en aspectos relacionados con la biología, ecología y economía.

3.3.2. Modelos basados en el Método Montecarlo

Uno de los modelos para simulación muy usados, son aquellos basados en el método Montecarlo. La simulación con Montecarlo es una técnica matemática computarizada que permite tener en cuenta el riesgo en análisis cuantitativos y tomas de decisiones. Es usualmente utilizada en muchos campos diferentes, como son el temas de finanzas, gestión de proyectos, energía, manufacturación, ingeniería, investigación y desarrollo, seguros, petróleo y gas, transporte y medio ambiente.

Este tipo de modelos ayudan en la toma de decisiones de una serie de resultados, así como la probabilidad de que se produzcan según las medidas tomada. Muestran las posibilidades extremas, así como todas las consecuencias de las decisiones intermedias.

La manera que funciona la simulación con Montecarlo, es con la realización de un análisis de riesgo con la creación de modelos de posibles resultados mediante la sustitución de un rango de valores (distribución de probabilidad) para cualquier factor de incertidumbre inherente. Luego, calcula los resultados una y otra vez, cada vez usando un grupo diferente de valores aleatorios de las funciones de probabilidad. Dependiendo del número de incertidumbres y de los rangos especificados, para completar una simulación con Montecarlo puede ser necesario realizar miles o decenas de miles de recálculos. Este tipo de simulación produce distribuciones de valores de resultados posibles.

El análisis de riesgo se puede realizar cualitativa y cuantitativamente. El análisis de riesgo cualitativo generalmente incluye la evaluación instintiva de una situación,. El análisis de riesgo cuantitativo trata de asignar valores numéricos a los riesgos, utilizando datos empíricos o cuantificando evaluaciones cualitativas.

Mediante el uso de distribuciones de probabilidad, las variables pueden generar diferentes probabilidades de que se produzcan diferentes resultados. Las distribuciones de probabilidad son una forma mucho más realista de describir la incertidumbre en las variables de un análisis de riesgo.

Durante la simulación, los valores se muestran aleatoriamente a partir de las distribuciones de probabilidad introducidas. Cada grupo de muestras se denomina iteración, y el resultado correspondiente de esa muestra queda registrado. La simulación con Montecarlo realiza esta operación cientos o miles de veces, y el resultado es una distribución de probabilidad de posibles resultados. De esta forma, la simulación con Montecarlo proporciona una visión mucho más completa de lo que puede suceder. Indica no sólo lo que puede suceder, sino la probabilidad de que suceda.

La simulación con Montecarlo proporciona una serie de ventajas:

- Resultados probabilísticos. Los resultados muestran no sólo lo que puede suceder, sino lo probable que es un resultado.
- Resultados gráficos. Los datos generados en una simulación Monte Carlo, facilitan la interpretación de los resultados y creación de gráficos.
- Análisis de sensibilidad. Resulta fácil ver qué variables introducidas tienen mayor influencia sobre los resultados finales.
- Análisis de escenario. Usando la simulación Monte Carlo, se pueden analizar exactamente los valores que tienen cada variable cuando se producen ciertos resultados.
- Correlación de variables de entrada. Es posible modelar relaciones interdependientes entre diferentes variables de entrada. Esto es importante para averiguar con precisión la razón real por la que, cuando algunos factores suben, otros suben o bajan paralelamente.

3.3.3. Modelos basados en Autómatas Celulares (AC)

Un autómata tiene muchos usos, entre ellas la imitación de organismos vivos y elementos sin vida de el entorno. Hay varios tipos de autómatas, cada uno con su propia definición formal. En otras palabras, un autómata es un mecanismo de procesos discretos, que se caracterizan por sus estados internos. Los cambios de estados de un autómata se producen con el tiempo, acorde a un conjunto de reglas que toman información de uno o varios estados del propio autómata, determinando el nuevo estado en el siguiente intervalo de tiempo. De esta manera, un autómata tiene la capacidad de procesar información de su entorno y sus características. Son abstracciones flexibles y eficientes que permiten la construcción de modelos dinámicos complejos, también se adaptan a la simulación de fenómenos geográficos. Formalmente, un autómata, A , puede ser representado como un conjunto de estados \mathbf{S} y un conjunto de reglas de transición \mathbf{T} .

$$A \sim (\mathbf{S}, \mathbf{T}) \tag{3.1}$$

Las reglas de transición definen un estado del autómata, S_{t+1} en el intervalo de tiempo $t + 1$ dependiendo de su estado, $S_t (S_t, S_{t+1} \in \mathbf{S})$, y la entrada, I_t , en el tiempo t :

$$\mathbf{T} : (S_t, I_t) \rightarrow S_{t+1} \quad (3.2)$$

Esta formulación básica no define el tipo de los estados $S \in \mathbf{S}$, o las posibles entradas $I \in \mathbf{I}$. El principal enfoque de los autómatas está en la discontinuidad temporal y la capacidad de cambiar de acuerdo a las reglas predeterminadas basadas en la información interna (\mathbf{S}) y externa (\mathbf{I}) del propio autómata.

Autómatas Celulares

Los AC son arreglos de células individuales sobre un espacio teselado, donde cada célula es influenciada por sus células vecinas. Regularmente, son divididos de manera regular, con células definidas por una red cuadrada o hexagonal, donde una celda representa a una célula del AC. Cada célula puede tomar un valor a partir de un conjunto de estados finitos. Las células adyacentes a una célula se le conoce como *vecindad*, en otras palabras, los vecinos de la dicha célula. De las definiciones generales (3.1) y (3.2) de un autómata podemos redefinir, A , para un AC de la siguiente manera:

$$A \sim (\mathbf{S}, \mathbf{T}, \mathbf{N}) \quad (3.3)$$

donde \mathbf{N} denota el número vecinos del autómata A y define el conjunto de células para la adquirir la información de entrada \mathbf{I} , lo cual es necesario para aplicar las reglas de transición. En un AC básico, las vecindades tienen forma idéntica para cada autómata, por ejemplo, la vecindad de Moore ó la vecindad de von Neumann (ver fig. 3.1); esto supone que la información de entrada es adquirida solamente desde una vecindad del autómata.

Suponer que los AC son muy regulares es muy superficial, los AC se han implementado en gran variedad de modelos y teselados no-regulares: redes arbitrarias, divisiones irregulares basados en SIG's en cobertura de parcelas de tierra, y teselados Voronoi [Benenson 2002, Osullivan 2001, Semboloni 1997, Shi 2000, Perez 2012]. La forma de la vecindad y el número de vecinos varía dependiendo del autómata del AC. Una variedad de definiciones de vecindades, basados en conectividad, adyacencia, o distancia pueden ser aplicadas a estos AC generalizados. Por lo cual, los modelos basados en AC han sido ampliamente utilizados para estudiar el desarrollo urbano, simulaciones del uso de suelo [Longley 2003].

La debilidad de los modelos basados en AC, es la incapacidad de las células del autómata a moverse. A pesar de los repetidos intentos de interpretar la movilidad [Benenson 1998,

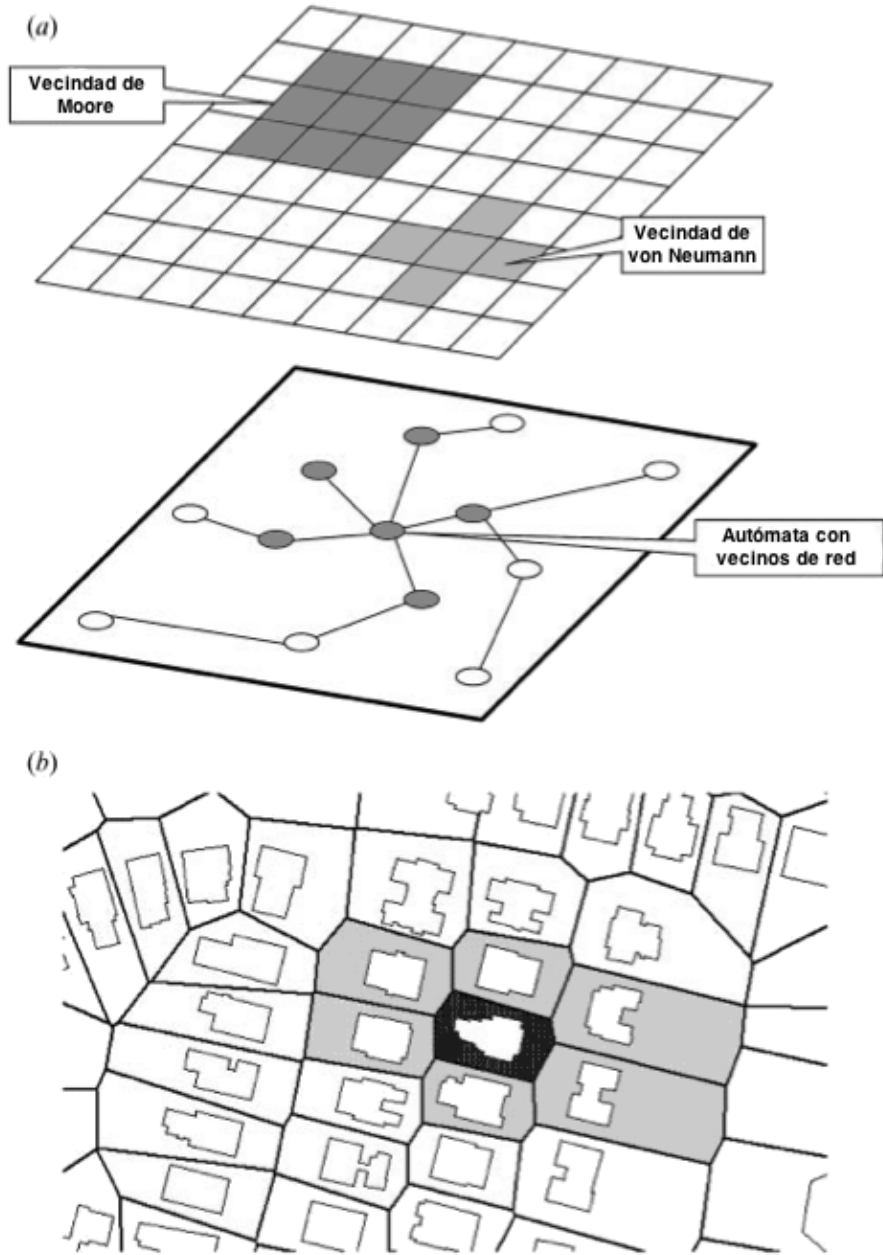


Figura 3.1: (a) Vecindades de Moore, von Neumann y Vecindad en red. (b) Vecindad en una red Voronoi (gris), basado en una cobertura de propiedad.

Schofisch 1996, Wahle 2001], la incapacidad real de permitir movimiento en este tipo de modelos, ha hecho que la tendencia vaya a la utilización de modelos basados en multi-agentes. De esta manera, en el modelado de geografía urbana se considera que el uso de AC es insuficiente para hacer frente a los objetos móviles, como peatones, migración de hogares o reubicación.

3.3.4. Modelos basados en Sistemas Multi-Agentes (SMA)

Una de las herramientas que surgió hace unos años con el objetivo de incluir fenómenos sociales y la dimensión humana de forma realista es el modelado basado en Sistemas Multi-Agentes.

La mayoría de los modelos con SMA aplicados en la gestión de recursos están estructurados con dos elementos, los agentes que representan las entidades del sistema a modelar y un AC simple que representan las entidades del entorno. La utilización de un autómata, en general, ha limitado las posibilidades de representación de los modelos a una superficie cuadrículada. Esto supone un proceso de abstracción que en determinadas ocasiones puede ser considerado excesivamente restrictivo. Puesto que uno de los objetivos de este tipo de modelado es buscar representaciones más realistas, en la actualidad están surgiendo iniciativas para integrar este tipo de modelos con sistemas de información geográfica.

Las aproximaciones basadas en SMA están siendo fuente de multitud de tecnologías en un amplio rango de áreas de investigación, tanto teóricas como aplicadas. Entre ellas podemos encontrar la ingeniería de software orientada a agentes, arquitecturas de agentes, agentes móviles, instituciones electrónicas o mecanismos de coordinación.

Esta técnica de modelado se ha convertido en una herramienta de investigación ampliamente reconocida en toda una diversidad de disciplina científicas como son la Economía, Sociología, Biología, Gestión de Recursos o la Ecología. Entre la razones principales para el uso de esta tecnología, son la capacidad para captar la heterogeneidad del sistema, la autonomía, la posibilidad de representar de forma explícita el espacio y las interacciones locales, la capacidad para implementar modelos de racionalidad limitada frente a modelos maximizadores, hacer ciencia integrada e interdisciplinaria, incluir procesos de participación en las etapas de modelado y validación, etc.

Básicamente todas esas ventajas metodológicas giran sobre a una idea común: puesto que la esencia del modelado basado en SMA es el establecimiento de una correspondencia directa entre las entidades (e interacciones) de un sistema y los agentes (y sus interac-

ciones), este tipo de modelado permite una representación computacional más realista e intuitiva de un fenómeno que la mayoría de las técnicas tradicionales de modelado [Batty 1999, Zhang 2011].

3.4. Modelos para el análisis geoespacial

El análisis espacial y las estadísticas espaciales son un componente fundamental de los SIG's. Los datos en un SIG son georeferenciados, es decir, procesa información de eventos o entidades geoespaciales con el fin de generar una información nueva mediante operaciones de manipulación y análisis que ayude a la toma de decisiones.

Los análisis geoespaciales combinan y manipulan los datos almacenados en el SIG para crear información nueva, la cual puede ilustrarse con mapas y resumirse en forma de registros para ser estudiados y decidir si el modelo adoptado constituye una solución plausible; incluyen medición de distancias y áreas, análisis de proximidad, operaciones de disolución y fusión de polígonos, superposición, análisis de superficies y análisis de redes (ver fig. 3.2).

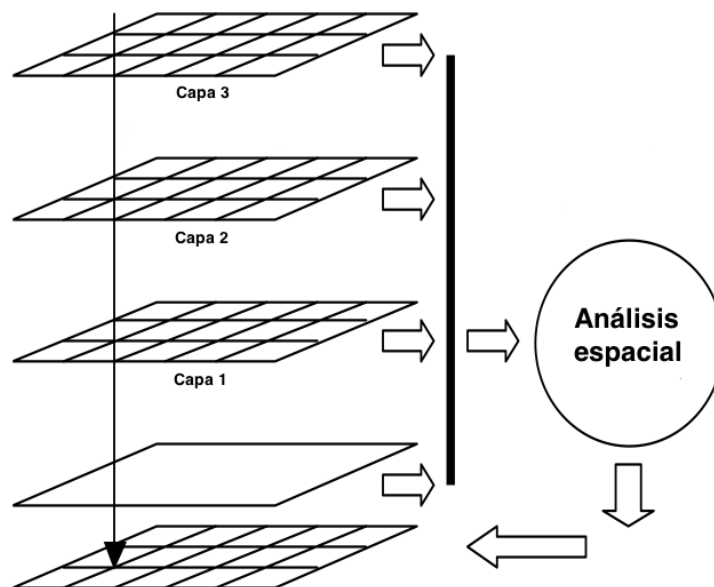


Figura 3.2: Análisis espacial sobre tres capas.

En el análisis geoespacial y métodos geoestadísticos utilizan frecuentemente métodos

de interpolación, por mencionar algunos de los más utilizados, los métodos de: Polígonos de Voronoi [Cressie 2011] y Kriging [He 2012].

Capítulo 4

Modelo Espacial

Un modelo espacial es la instancia de un espacio físico, este espacio está definido por un área geográfica y sus atributos. Un modelo espacio-temporal es aquel donde la variable tiempo es añadida [Wegener, M. 2000]. En el ámbito de los sistemas dinámicos, los modelos espacio-temporal son utilizados para simular y predecir comportamientos dentro de un área geográfica. Es común encontrar múltiples aplicaciones en ciencias como ecología, sociales, entre otras, donde el modelo integra un sistema geográfico como base de visualización y control de las simulaciones. En específico, los SIG son herramientas capaces de manipular información espacial, esta capacidad hace posible implementar modelos de simulación espacial desde una perspectiva geográfica. El SIG provee ventajas en diferentes fases del proceso de modelado. Sin embargo, en la creación de un modelo espacial-temporal todavía existen retos que modelos con base en un SIG deben enfrentar.

4.1. Conceptualización del modelo espacial

Un desafío importante en los modelos espaciales en sistemas dinámicos es la conceptualización de modelos teóricos del mundo físico [Boccaro, N. 2010]. El primer paso de la conceptualización de un modelo, es la descripción del entorno que se desea estudiar. Es decir, es posible clasificar al modelo en un área de investigación. Sin embargo, en el caso de los modelos para sistemas dinámicos existe la tendencia de conjuntar muchas áreas de conocimiento para resolver un problema común. Esta tendencia se observa en ciencias como biología, ecología, ciencias sociales, entre otras, donde el modelado está enfocado en la urgente necesidad de generar aplicaciones para el desarrollo sustentable [Kates, R.W.,

2012]. La integración de múltiples disciplinas en el modelado es un factor de la creación de modelos espaciales genéricos. Estos modelos promueven el uso de diferentes estructuras de representación. Esta característica permite representar el espacio físico en más de una manera, en consecuencia, el comportamiento de un fenómeno dinámico es evaluado desde diferentes perspectivas. Como resultado, los modelos espaciales genéricos tienen el desafío de integrar diferentes metodologías y enfrentar los problemas habituales en el modelado de sistemas dinámicos.

En la literatura, existen modelos que dan un primer paso a la generalización mediante la construcción de una plataforma integrada de simulación en sistemas geográficos [Langloise, P., 2009 y Taillandier, P., et al., 2010]. En [Langloise, P., 2009] se describe una plataforma de simulación diseñada para aplicaciones de índole ambiental. Esta plataforma se basa en un meta-modelo para SIG, el modelo espacial está definido con las estructuras teseleadas cuadrada y hexagonal. Además, se basa en un modelo dinámico de AC con la característica de definir estados y funciones desde el SIG. Otro trabajo de integración y generalización es descrito en [Taillandier, P., et al., 2010], donde se presenta un framework de simulación para aplicaciones de contexto social. Este framework utiliza un meta-modelo que describe un modelo dinámico en base a sistemas multi-agentes y un modelo espacial definido por objetos vectoriales (polígonos, líneas, puntos, etc.). En resumen, el objetivo de los modelos espacial genérico es proporcionar un cierto nivel de abstracción con la capacidad de concebir, generar, simular y observar uno o más casos de estudio de una cierta categoría.

En la conceptualización de un modelo espacial genérico existen consideraciones que deben tomarse en cuenta cuando se desea modelar un sistema dinámico en base a un área geográfica. Una es la abstracción del espacio físico, esta define la representación aproximada del área geográfica con el uso de formas geométricas, tales como cuadrados, hexágonos, polígonos, entre otros [Fabrikant, S. I., 2003]. Los objetos geométricos se organizan sobre una estructura regular o irregular, esto permite abstraer la información espacial a una forma más fácil de manipular, a lo que llamaremos como estructura teseleada. Otra consideración es la interpretación del comportamiento del sistema dinámico en estudio. En la abstracción del comportamiento es necesario utilizar un modelo dinámico. Este es un modelo matemático, donde se definen las variables y funciones que describe un sistema en base a espacio y tiempo. El modelo dinámico interactúa directamente con el modelo

espacial, esta interacción se realiza sobre una estructura teseleada, donde variables y funciones deben adaptarse al tipo de estructura. El resultado de la estrecha relación entre modelo espacial y dinámico es la creación de modelos para problemas específicos en los cuales el modelo dinámico está acoplado a una sola estructura teseleada. Por lo tanto, un modelo espacial genérico debe considerar estructuras donde un o más modelos dinámicos puedan ser aplicados, y a su vez, estructuras que puedan ser transformadas para un modelo dinámico en específico.

4.2. Modelado espacio-temporal

Los problemas en el proceso de modelado se describen en base a dos aspectos, la espacial y la dinámica, ambas son determinantes en la construcción de modelos de simulación espacio-temporal. El primer aspecto implica a los modelos espaciales y la representación de las estructuras de los datos. Se enfoca en el proceso de elección de la estructura de representación en el modelo, que llamaremos como *teselación*. Una teselación es la abstracción geométrica de los datos espaciales. Entre las teselaciones existentes, las más usadas en los modelos actuales se encuentran: DEM (Digital Elevation Model), TIN (Triangular Irregular Network), voronoi, cuadradas y hexagonales. En un modelo espacial, la teselación puede ser definida por un análisis previo de las estructuras factibles para describir el sistema dinámico. En consecuencia, existen muchos modelos con una sola representación del espacio físico y son diseñados para un área de estudio en específico.

Otro problema existente en el aspecto espacial, es la escala de representación de la estructuras, o bien, llamado como el problema de escala. Las teselaciones son construidas a partir de la cantidad de información espacial, en decir, el tamaño de una estructura está asociada a una escala de representación [Qi, Y. and Wu, J., 1996]. Una escala de representación puede variar dependiendo de la granularidad de los datos espaciales. En una simulación, una escala apropiada de los datos en el modelo dinámico puede significar resultados correctos y coherentes, o en caso contrario, resultados erróneos e irrelevantes.

El primer aspecto hace referencia a las estructuras y su escala, mientras que el segundo aspecto toma en cuenta los modelos dinámicos temporal. Estos modelos pueden ser continuos y discretos. El problema principal que enfrentan estos modelos, es la definición de las variables y funciones del sistema dinámico. En un modelo de simulación, el modelo espacial tiene un rol importante en determinar el modelo dinámico a utilizar. Las

características de una teselación como: forma geométrica, regular o irregular y escala, son determinantes en la aplicación del modelo dinámico.

Las perspectivas espacial y dinámico del problema espacio-temporal establecen los puntos importantes para crear un modelo de simulación en SIG. A nivel aplicación, esto constituye en el desarrollo de un simulador que debe contener: 1) un modelo topológico de representación espacial en escala y datos, 2) un modelo dinámico de representación del fenómeno, modelando el comportamiento en escala e interacciones con una teselación espacial. Desde este enfoque, las ventajas que ofrece un SIG son de importancia, no como una herramienta más de apoyo, sino un componente crucial en la creación de modelos espacial-temporal.

4.2.1. Abstracción del modelo espacial

Un punto importante en la desarrollo de un modelo espacial es el proceso de abstracción. Un esquema comúnmente utilizado para abstraer el modelo espacial, es el esquema propuesto por [Peuquet, D. J., 1984]. Este esquema propone tres niveles de abstracción para el diseño e implementación de un modelo de datos espaciales en SIG.

De acuerdo a este esquema en el diseño del modelo se debe considerar lo siguiente:

- ¿Cuales elementos del área de estudio (objetos espaciales) son necesarios para representar apropiadamente el sistema bajo consideración (nivel de abstracción 1).
- ¿Cuál es la aproximación que debe ser usado para manejar y desplegar los objetos espaciales (nivel de abstracción 2).
- ¿Qué conjunto de instrucciones e información es necesario para reconstruir el modelo de datos espacial en formato digital (nivel de abstracción 3).

Acorde al primer paso de abstracción (nivel 1) necesitamos identificar las características/objetos que serán representados con el SIG. El diseño y construcción del SIG depende la identificación exitosa de una serie de primitivas geométricas. Estas primitivas son la base de un modelo de datos espaciales. Todo fenómeno geográfico puede, al menos en dos dimensiones, ser representado por una de tres tipos de primitivas: puntos, líneas y áreas.

- **Punto:** Un punto es una sola coordenada (x, y) usado para describir la ubicación de un objeto de tamaño y longitud cero a escala de trabajo en el SIG

- **Línea:** Las líneas conectan dos o más puntos, y pueden ser usadas para representar características de una dimensión.
- **Área:** Un área es una entidad usada para representar la extensión de una característica en particular.

Estas primitivas geométricas no siempre son la manera más apropiada para representar formas de elementos de un área geográfica que se incluirán en un SIG. Existen otros conceptos como superficies y redes, que son extensiones de las primitivas de área y línea. Estas permiten recrear otro tipo entidades espaciales más complicados de representar. En muchos casos, el rango de este tipo de entidades espaciales está limitada por la información geográfica del área.

- **Superficies:** Una superficie puede ser definida como una entidad continua para los que en cualquier ubicación hay una medida o valor que puede ser cuantitativo o cualitativo.
- **Redes:** Una red puede ser considerada como una serie de líneas interconectadas a lo largo de las cual hay un flujo de información.

Sin embargo, estas geometrías son inapropiadas si deseamos modelar un sistema dinámico en un SIG, para ello es necesario definir geometrías que permitan discretizar los elementos de un área geográfica. Esta es la razón principal de la introducción de estructuras geométricas que nosotros llamamos como estructuras teseleadas. Para definir las estructuras teseleadas de un modelo espacial, es necesario conocer el concepto de teselación espacial.

4.2.2. Teselaciones Espaciales

Una teselación de d -dimensiones, espacio euclidiano, R^d , puede ser definido desde dos perspectivas diferentes pero equivalentes. Se puede considerar como una subdivisión de R^d en d -dimensiones, regiones no superpuestas o como un conjunto de regiones de d -dimensiones las cuales cubren R^d sin huecos o traslapes. Estas dos perspectivas están reflejadas en el uso de varios sinónimos para teselaciones, particiones y látices, siendo esta última la más común. Ambas perspectivas pueden ser expresada en una única definición formal de teselación, pero es importante mantener la distinción del contexto de SIG. La

primera perspectiva, enfatiza las fronteras de las regiones, es consistente con la estructura de datos vectoriales. La segunda se enfoca en el interior de las regiones, es equivalente a una estructura de datos raster.

Para empezar con una definición formal de una teselación: Sea S un subconjunto cerrado de R^d , $I = \{s_1, \dots, s_n\}$ donde s_i es un subconjunto de S , y s_i' el interior de s_i . Si los elementos de I satisfacen:

$$s_i' \cap s_j' = \emptyset \text{ para } i \neq j \quad (4.1)$$

$$\bigcup_{i=1}^n s_i = S, \quad (4.2)$$

entonces el conjunto I es llamado como una teselación de S . La propiedad 4.1 significa que los interiores de los elementos de I son disjuntos y 4.2 significa que la unión de los elementos de I llenan el espacio S . Esta definición es consistente con las aplicaciones prácticas encontradas en SIG's, donde el espacio bajo consideración es una región cerrada en un espacio euclidiano. Cuando $d = 2$ la teselación es llamada una *teselación planar*. Este tipo de teselación es la más común encontrada en SIG's.

Las teselaciones planares están compuestas por tres elementos de d ($d \leq 2$) dimensiones: celdas (2-d), aristas (1-d), y vértices (0-d). En SIG's estos elementos son las mismas primitivas geométricas de la sección anterior (áreas, líneas y puntos, respectivamente). Las celdas tienen bordes (1-d) y esquinas (0-d), las líneas tienen puntos finales (0-d). Una teselación en la cual las esquinas y bordes de las celdas individuales coinciden con los vértices y aristas de la teselación, respectivamente, es llamada una *teselación arista-a-arista*.

Una *teselación monohedral* es una en la cual todas las celdas son del mismo tamaño y forma. Si r_i denota el número de aristas unidas a la i esquina de una celda en una teselación monohedral, una *teselación isohedral* es una en la cual la secuencia ordenada de los valores de r_i es la misma para cada celda.

Un polígono regular es uno con los lados de igual longitud y ángulos internos iguales. Si nos enfocáramos en las teselaciones que consisten solo de polígonos regulares, el número de teselaciones sería infinito. Sin embargo, si definimos la condición que todos los vértices de la teselación sean del mismo tipo, el número de teselaciones se reduce a solo 11. Estas son conocidas como *teselaciones uniformes*.

De las 11 teselaciones uniformes solo tres también son teselaciones isohedral (es decir, estas consisten de triángulos regulares, cuadrados, o hexágonos) y son llamadas *teselaciones regulares*.

En el ámbito de los SIG's, la teselaciones regulares son ampliamente usadas. La construcción de estas teselaciones en un SIG se realizan a partir de modelos de datos espaciales como son los raster y vectoriales. Las estructuras definidas por tipos de teselaciones, son aquellas a la que nosotros denominamos como *estructuras teseleadas*. En posteriores secciones, abordaremos el tema de los modelos de datos espaciales y de las estructuras teseleadas como conceptos importantes en en planteamiento de nuestro modelo espacial.

4.2.3. Modelos de datos espaciales

Los siguientes pasos en el proceso de abstracción (niveles 2 y 3) concierne al diseño, representación e implementación de las entidades espaciales en el SIG. En los SIG's es mayormente utilizados dos métodos para gestionar y visualizar los entidades espaciales. Estos comúnmente se refieren a aproximaciones raster y vectoriales. Los conjuntos de datos raster se caracterizan por su estructura de una cuadrícula de celdas, mientras la aproximación vectorial consiste en utilizar la geometría de coordenadas en un intento de representar las características u objetos de interés lo más exactamente posible. Ambos son modelos de datos espaciales¹ y existen una gran diversidad de estructuras de datos para representarlos lo cual es una de las razones por la que el intercambio de datos espaciales en SIG es problemático.

Los modelos de datos espaciales son la base de la construcción de las estructuras teseleadas, apartir de ellos es posible modificar la organización de los datos en estructuras geométricas que se adaptan a algún modelo dinámico específico.

¹El término modelo de datos espaciales es comúnmente usado para describir estos dos términos (raster y vectorial). Esto puede ser confuso con el término de modelado espacial, el cual es usado para describir el proceso completo de representación de la realidad. Con esto en cuenta, nos referiremos a modelos de datos espaciales a los términos de raster y vectorial.

4.3. Meta-modelo espacial

En esta sección describe el modelo espacial genérico que contempla los problemas espacio-temporal y está enfocado en construcción y transformación de las estructuras tesseleadas utilizadas en los modelos de simulación espacial. El modelo se identifica como un meta-modelo espacial, principalmente por la característica adaptar y modificar la estructura a partir de la información espacial disponible. Desde este enfoque, el meta-modelo espacial es la generalización e integración de algunas de las estructuras tesseleadas para una gama de aplicaciones.

4.3.1. Meta-modelo espacial propuesto

En la creación de nuestro modelo espacial, proponemos utilizar la herramientas que nos permitan abstraer algoritmos, funciones, transformaciones, etc., a un lenguaje estandarizado y con acceso a múltiples plataformas de software. De igual manera, los SIG's son importantes en la propuesta, pero hacemos énfasis en el rol de las bases de datos espaciales. De las opciones posibles, optamos por proponer la inclusión de nuevas funciones en las bases de datos espaciales. Los sistemas manejadores de base de datos (SMBD) proveen la capacidad de agregar tipos de datos geoespaciales, agregación de funciones y lenguajes propios para gestionar datos y objetos del tipo geoespacial. Con esta decisión, la BD espacial es el componente principal del meta-modelo. En [Rigaux, P., et al, 2002] se enfatizaba en el uso del SMBD como soporte en las aplicaciones de manipulación de datos geoespaciales. Algunas de las características destacables que provee el SMBD son: (a) la utilización de lenguaje de consulta SQL para manipular los datos espaciales, (b) funciones SMBD adaptadas para manejar eficientemente los datos, y (c) modelos de datos que facilitan el modelado, uso e integración. Las ventajas desde el enfoque de la propuesta son: (1) independencia del manejo de los números formatos de archivos geoespaciales, (2) las aplicaciones SIGs solo se encargan de la visualización de mapas y control de las variables de entrada del modelo, (3) la plataforma de desarrollo es indistinto para el meta-modelo y las funciones para los objetos geoespaciales se realizan con consultas SQL, (4) la posibilidad de generar múltiples teselaciones para solo un caso de estudio, y finalmente, (5) aplicar diferentes escalas de representación para las teselaciones acorde a la cantidad de información espacial disponible. El meta-modelo está estructurado en tres apartes como se muestra en la fig. 4.1: (a) un sistema de información geográfica para la visualización y

control de los datos geoespaciales, (b) el SMBD para el manejo de la información espacial y ejecución de las consultas SQL y (c) una BD espacial que almacena los datos y funciones geoespaciales. El resultado de la interacción entre las tres partes es un proceso que consiste en cuatro etapas. La primera etapa corresponde a la selección y visualización de los datos geoespaciales. La selección consiste en elegir las capas geográficas que conforman el área geográfica de estudio mediante peticiones a la BD espacial. La visualización de las capas es tarea de SIG que recibe y muestra las extraídas de la BD. La segunda etapa consiste en introducir al modelo los parámetros necesarios para construir una teselación a partir de las capas seleccionadas. Los parámetros definen los atributos de la teselación tales como el tipo, dimensión, escala de representación, número de capas a interpolar, entre otros. Un módulo de control de la interfaz del SIG realiza la función de agregar los parámetros proporcionados por un agente externo. La tercera etapa es la construcción de las teselaciones, en ella intervienen el SMBD, la BD espacial y las funciones espaciales. El primer paso en esta etapa es la construcción de una o más sentencias SQL que incorporen las capas y parámetros definidos en la etapas anteriores. El SMBD recibe, interpreta y ejecuta las sentencias SQL. La teselación es generada a partir de la aplicación de funciones espaciales en las capas almacenadas en la BD. Estas funciones están definidas en el modelo con el propósito de transformar la geometría de los datos espaciales en una nueva representación geométrica. En la etapa final del proceso la BD almacena la teselación y el SIG la visualiza. El resultado del modelo es una estructura teseleada apta para su uso en algún modelo dinámico.

El meta-modelo considera la construcción de diferentes teselaciones con el objetivo de aportar a las diversas aplicaciones la capacidad de representar y evaluar de manera diferente el área geográfica en estudio.

4.3.2. Estructuras teseleadas

Las estructuras teseleadas son la base principal de nuestro meta-modelo, estas representan la simplificación geométrica de los objetos geoespaciales descritos por datos vectoriales y rasters. En el contexto de los procesos de simulación espacial, la elección correcta de una estructura topológica significa obtener resultados precisos y realistas. Existen una variedad de estructuras, cada una de ellas tienen sus ventajas y desventajas, pero en casos particulares alguna puede obtener mejores resultados que las otras. De acuerdo a [Langloise, P., 2011], la teselación es una colección de objetos geográficos es la estructura que

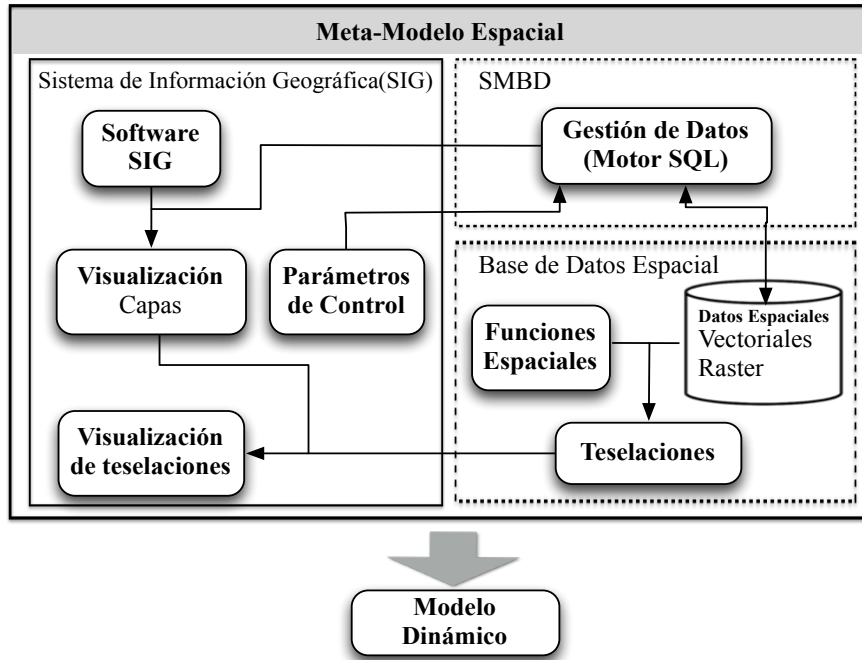


Figura 4.1: Diagrama general del Meta-modelo Espacial

permite la organización de proximidad y vecindad entre objetos. A nivel aplicación, las estructuras teseleadas son objetos geoespaciales organizados de manera regular o irregular sobre un espacio geográfico. En una BD espacial, los objetos geoespaciales son representados por datos lógicos que definen los modelos de datos espacial (vectorial y raster). Para generar una estructura teseleada es necesario modificar la geometría de los objetos; pero sin pérdida de la información que describen a dichos objetos. En los modelos espaciales, la información espacial y el caso de estudio son los que definen la teselación. Las transformaciones de teselación sobre la información espacial hacen posible aplicar más de una teselación al caso estudiado. Elegimos dos tipos de teselaciones las cuales son útiles en la simulación espacial: cuadrada y hexagonal. La cuadrada es un estructura regular definida por celdas o cuadrados de un mismo tamaño. Es la estructura más usada en el ámbito de modelos dinámicos. Se pueden encontrar diversos trabajos con este tipo de teselación [Moreno, N., 2008, Birch, C., et al., 2007]. La hexagonal está definida por una retícula de hexágonos regulares del mismo tamaño. Regularmente es utilizada en trabajos de relacionados con ciencias biológicas y ambientales, trabajos como el descrito en [D'Ambrosio

et al. 2003] advierten de las ventajas de una teselación hexagonal sobre una cuadrada, mientras otros ya los aplican en sus modelos espaciales [Sahr, K., 2011, Sammari, H., et al 2012, Radiogullari, A., 2015].

Funciones de teseleado

El meta-modelo define dos tipos de teselaciones, la teselación cuadrada y hexagonal. Ambos tipos de teselaciones son comunes en el modelado de sistemas dinámicos discretos. En el contexto de los SIG las teselaciones con la representación discreta de un conjunto de capas de información espacial. Como se mencionó en capítulos anteriores, las capas de información son de tipos de datos: vectorial y raster. En este caso, nuestro meta-modelo describe funciones que reciben un conjunto de argumentos que son la descripción del tipo de teseleado y sus características. En fig 4.2, el conjunto de capas de información M y el conjunto de variables de descripción V son definidos de lado del SIG.

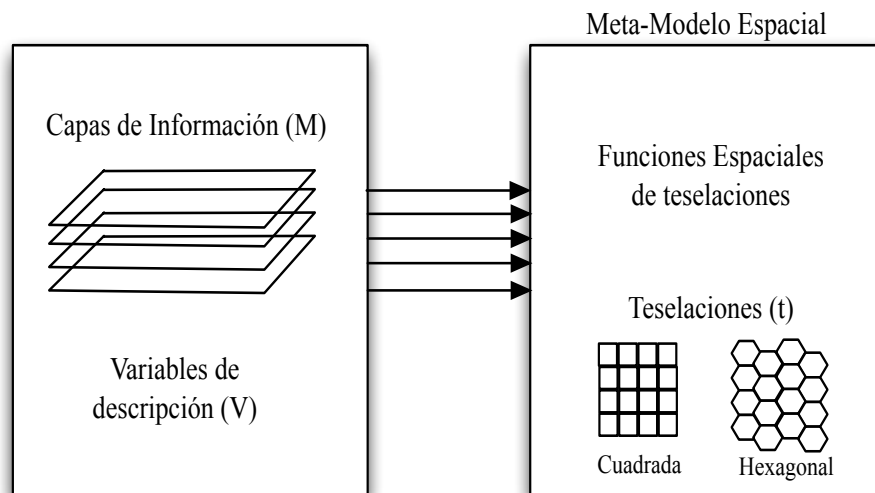


Figura 4.2: Descripción la interacción de las capas de información y el conjunto funciones de espaciales para el teseleado

Las funciones transforman el conjunto de datos M (de tipo vectorial o raster) en un conjunto de teselaciones alineadas y coherentes entre si, de tal manera que sea una representación equivalente de las capas de información. Podemos decir que las funciones

derivan de la una función principal de transformación que denominamos como T , la cual recibe los conjuntos M , V y como resultado es un conjunto de un teselaciones t :

$$T : (M, V, e) \rightarrow t \text{ donde:}$$

- $M(m_1, m_2, \dots, m_n)$ son las capas de información espacial, por ejemplo: capas de uso de suelo, lagos, ríos, carreteras, etc.
- $V(v_1, v_2, \dots, v_n)$ son el el conjunto de variables de descripción del conjunto de teselaciones a obtener, ejemplo: número de celdas, largo y ancho de la teselación, valores de las celdas, etc.
- e es el tipo de del conjunto de teselaciones, puede ser cuadrada o hexagonal.

Con la propuesta de nuestro modelo, fue necesario presentar una descripción y un prototipo de implementación de las funciones espaciales, con el fin de definir las características del SIG para la aplicación del modelo dinámico.

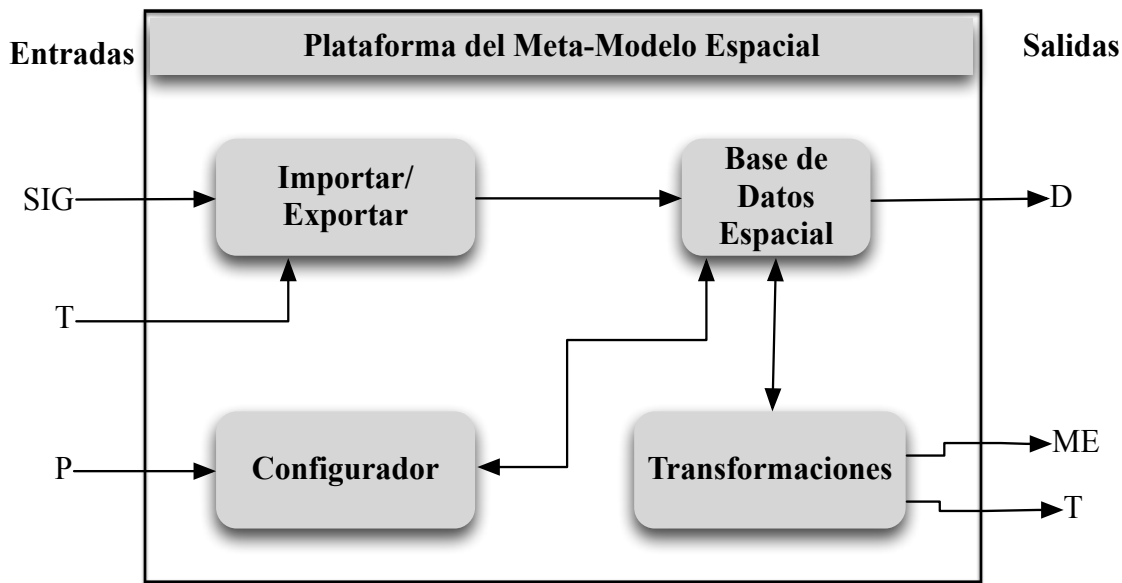
4.3.3. Plataforma del meta-modelo espacial

Con base en lo descrito en la secciones anteriores, definimos un diagrama general de los módulos que conforman la plataforma del meta-modelo espacial (ver fig.4.3).

La plataforma está integrada por 4 módulos: 1) *Importar/Exportar* recibe de entrada datos espaciales, información descriptiva (D) y teselaciones (T), y los envía la BD espacial; 2) *Base de Datos Espacial* contiene la información espacial (D) y en conjunción con el módulo *Configurador* determina las variables de construcción de las estructuras teseleadas (T); 3) *Configurador* es el módulo que recibe de entrada los parámetros (P) de construcción de las estructuras y los envía a la BD espacial; y 4) *Transformaciones* es el módulo que utiliza funciones para construir las estructuras de representación, su salida es una teselación (T).

Implementación: prototipo

Se implementó un prototipo con base en el diagrama del meta-modelo espacial propuesto. Para ello, desarrollamos un SIG para el control y visualización de los datos espaciales, creamos una BD espacial incluyendo las funciones de construcción de estructuras topológicas y conectamos ambos con un conector JDBC.



SIG: contiene capas espaciales, datos descriptivos (D) y su propio modelo de datos espaciales (ME)
T: teselaciones (cuadrada, hexagonal)
P: parámetros (dimensiones, tipo de teselación, escala)
D: datos espaciales (capas)
ME: Modelo Espacial (T, D)

Figura 4.3: Diagrama de la Plataforma del Meta-modelo Espacial

El SIG se desarrolló con la herramienta de software MatLab, en el lenguaje de programación del mismo nombre. Matlab ofrece un entorno gráfico para el desarrollo de aplicaciones y en su caja de herramienta Mapping Toolbox provee algoritmos, funciones para análisis geográfico y visualización de mapas.

Para crear la BD espacial se utilizó el sistemas manejador de base de datos PostgreSQL, el cual es de código abierto y utilizado en aplicaciones SIG. Para aplicaciones geográficas provee una extensión llamada PostGIS. PotsGIS contiene funciones basadas en lenguaje SQL para gestionar datos espaciales y es compatible con la librería GDAL (Geospatial Data Abstraction Library), biblioteca elegida para realizar las conversiones entre los modelos de datos espaciales vectorial y raster.

La comunicación entre MatLab y la BD, se realiza mediante la API JDBC para PostgreSQL, la api permite consultas SQL que derivan en control y manipulación de los datos.

Los elementos del modelo descritos anteriormente se visualizan en la figura 4.4.

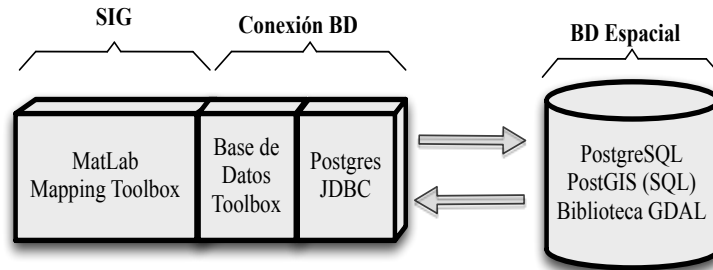


Figura 4.4: Componentes principales del modelo espacial en el SIG

La información espacial como mapas de división política, áreas urbanas, servicios, entre otros; se obtuvieron de la cartografía proporcionada por el INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). Se seleccionaron cartas geográficas con escala 1: 50,000 de la zona urbana de la Ciudad de México (ver fig. 4.5). Esta información es utilizada para visualizar los resultados y evaluar al modelo. La entrada los datos espaciales al modelo es a partir de archivos con formatos estandarizados para datos vectoriales y raster. En nuestro caso, la cartas se encuentran en archivos de tipos shapefile (.shp) para vectorial y de imagen (.tiff) para raster. Los archivos fueron exportados a la base de datos con funciones de la biblioteca GDAL.

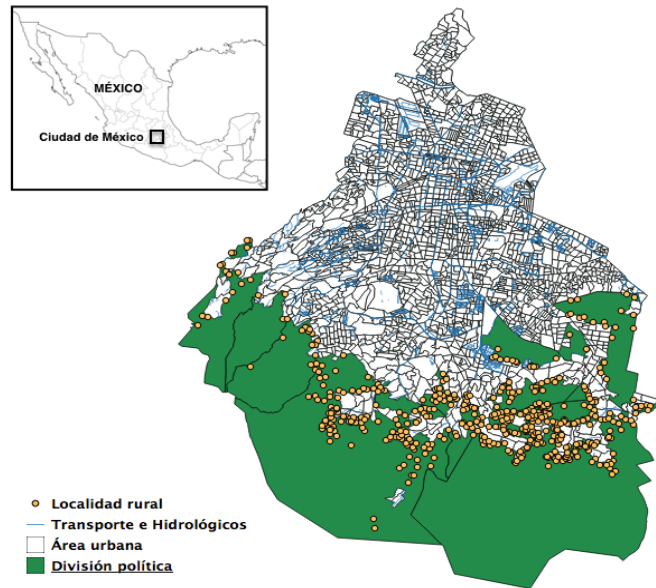


Figura 4.5: Mapas de la zona urbana de la Ciudad de México

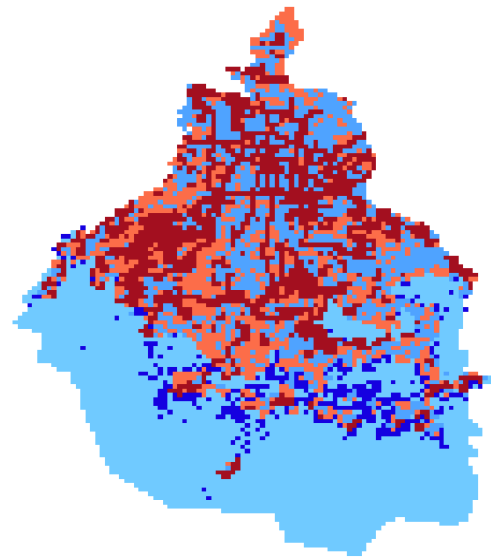
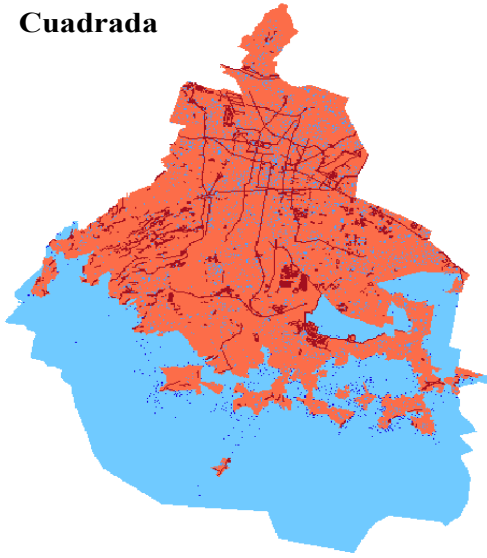
El SIG fue diseñado con tres módulos relacionados: 1) *Conexión*: módulo que permite la conectividad de la BD y realización de consultas, 2) *Visualización*: presenta los mapas extraídos de la BD en forma de capas y atributos correspondientes, y 3) *Control*: módulo que permite definir tipo de estructura teseleada, dimensiones, tipo y tamaño de pixel, valores nulos y algunos propios de los formatos raster y vectorial. La interfaz construida permite visualizar el contenido de la BD y configurar las opciones necesarias para la construcción de las estructuras.

En la BD espacial, con ayuda de la extensión PostGIS se implementó un conjunto de funciones SQL. Las funciones se desarrollaron en el lenguaje PL/pgSQL. Este lenguaje propio del SMBD de PostgreSQL permite funciones que pueden ser llamadas desde sentencias comandos SQL. El propósito de las funciones es realizar todas las operaciones de construcción y transformación de estructuras en la BD. Las funciones reciben como argumentos de entrada los parámetros definidos en el módulo de control, y como salida crea un o más tablas que representan la estructura teseleada correspondiente a los argumentos de entrada. Las tablas son enviadas a través el módulo de conexión y visualizadas en forma de mapas por el módulo de visualización.

Como resultado de la implementación, se obtuvo una plataforma integrada capaz de crear un entorno de control y construcción de las estructuras teseleadas. La plataforma recibe de entrada el conjunto de capas del área geográfica estudiada, importadas a partir de archivos, o desde la BD espacial en los datos raster o vectorial. Posteriormente, el control y la definición de los parámetros de las estructuras se realizan mediante los módulos de visualización y control del SIG. Una vez definido los parámetros, son enviados a la BD y se generan las estructuras teseleadas a través de funciones espaciales. Las estructuras creadas son el resultado de la interpolación de las capas de entrada, donde cada una de las capas es transformada en una versión de la estructura definida por los parámetros, posteriormente se realiza una interpolación entre ellas y se construye una única estructura teseleada. El ejemplo de la fig. 4.6, presenta el área de estudio con cinco capas interpoladas, donde la salida son dos tipos de estructuras, la primera cuadrada y la segunda hexagonal.

En ambos casos, la escala de representación varía de una granularidad fina a una gruesa. Además, las dimensiones pueden ser modificadas, pero se conserva la proporción de los datos espaciales. Algo a considerar es el número de capas, el modelo permite interpolar capas como información espacial se tenga, pero entre más capas sean añadidas, el tiempo de construcción se incrementa y el proceso de simulación sobre ellas es más complejo.

Cuadrada



Hexagonal

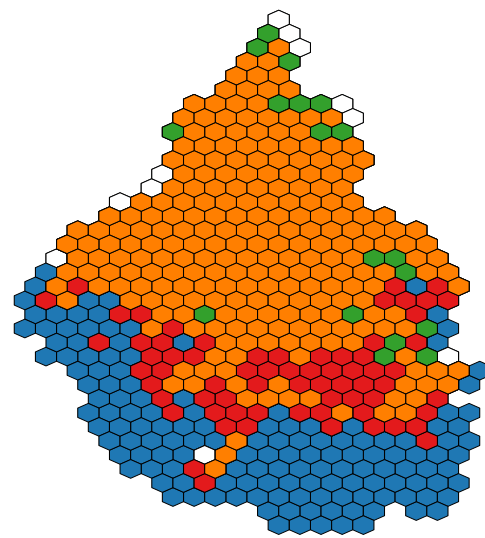
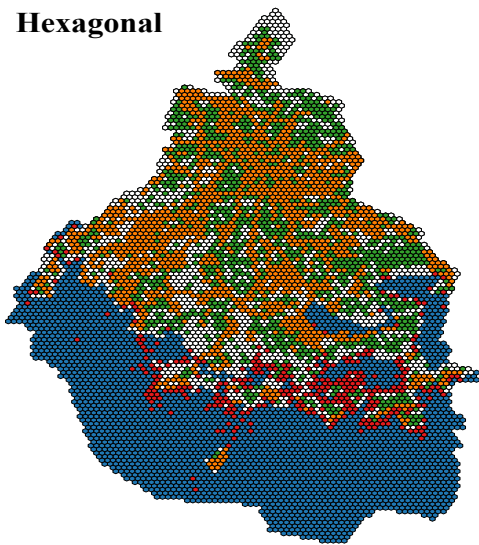


Figura 4.6: Estructuras teseleadas para cinco capas de datos espaciales, cuadrada y hexagonal respectivamente

Capítulo 5

Modelo Dinámico

En este capítulo se abordará el aspecto dinámico del meta-modelo. Este constituye en el uso de los autómatas celulares como modelo dinámico para el modelado de los sistemas dinámicos discretos.

5.1. Meta-modelo dinámico

5.1.1. Conceptos clave de un Autómata Celular

La literatura ofrece muchas definiciones para un AC, aunque el énfasis en las definiciones puede ser diferente, el concepto principal es generalmente el mismo [Wolfram, S.,1986] describe un AC como:

Idealizaciones matemáticas de sistemas físicos en los que los pasos de tiempo son concretos y las cantidades físicas toman un conjunto de valores discretos. Un autómata celular adquiere un conjunto finito de valores discretos. Un AC en una “*lattice*” regular uniforme (o “matriz”) generalmente de extensión infinita, con una variable discreta en cada sitio (“célula”). El estado de un AC está completamente especificado por los valores de las variables de cada sitio. Un AC evoluciona en pasos de tiempos discretos, con el valor de la variable siendo afectado por el valor de las variables en su “vecindario” en el previo paso de tiempo. El vecindario generalmente se toma como sitio donde se ubica la célula y todos los sitios adyacentes de las células vecinas. Las variables en cada sitio se actualizan simultáneamente (“sincrónicamente”), en función de los valores de las variables en su vecindario en el paso anterior de tiempo, y de acuerdo con un conjunto de

“reglas locales”.

5.1.2. Estructura de un AC

- *“Lattice”*: Un AC consiste en arreglos de células en una retícula. Las células son de igual forma, tamaño y están situadas a intervalos regulares de cada una. Los AC en principio son modelos espaciales. Un AC con una retícula rectangular de 2-dimensiones de cuadros es el más común.
- *Vecindad*: Los AC dinámicos están basados en interacciones locales. Esto significa que el estado de una célula en el siguiente paso de tiempo depende de los estados de las células en su vecindario. Las cuales son células vecinas y estas son definidas como la vecindad.
- *Células de estado discreto*: Las células solo pueden tener un conjunto limitado de estados discretos. El conjunto de estados pueden ser numérico pero mayormente son nominales.
- *Reglas de transición*: Las reglas de transición, o reglas locales, son una función de estados de las células de la vecindad y determina el estado de cada una de ellas en el siguiente paso de tiempo.
- *Paso de tiempo discretos*: El AC evoluciona, como resultado de la repetición y actualización simultánea de las células. Así, los AC son (o modelo) en principio un sistema dinámico.

Una definición más formal sería que un AC está representado por medio de una estructura regular de máquinas de estados finitos (células), comunicándose simultáneamente de acuerdo a un patrón de uniforme localmente definido. Cada célula del autómata está definida a partir de la siguiente tupla:

$$(S, T, R); \tag{5.1}$$

donde S es el conjunto de estados, R es el conjunto de entrada (ambos conjuntos son finitos), y T es la función para calcular el siguiente estado o la regla de evolución. El conjunto de entrada se define a partir de n -tuplas de estados de un conjunto finito de células vecinas. Así pues, un AC que opera en dos dimensiones su vecindad consiste

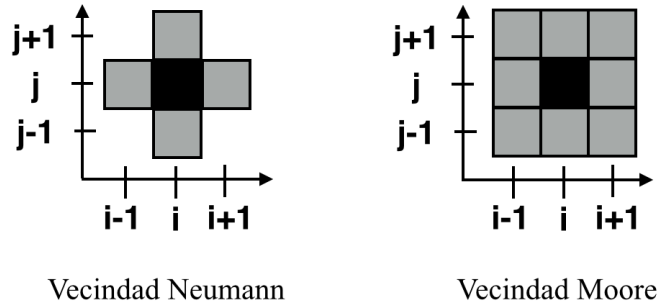


Figura 5.1: Vecindades de Neumann y Moore

típicamente de cuatro u ocho células, por ejemplo, las células adyacentes en una teselación cuadrada. Las vecindades más conocidas son las de von Neumann y Moore (ver fig.5.1).

5.1.3. AC como modelo de simulación en SIG

Los modelos de simulación con base en AC son diseñados para simular sistemas en los cuales las propiedades globales que emergen desde interacciones locales de el sistema básico de entidades. Varias disciplinas han aprovechado el potencial de estos modelos para aplicaciones ambientales y la adaptación de un formalismo para simular fenómenos del mundo real.

Los modelos AC pueden abstraer condiciones del mundo real que son definidos por el sistema dinámico, como es el crecimiento de población. Además, las reglas de transición deterministas, reglas estocásticas son comúnmente aplicadas para capturar la variabilidad intrínseca de la sistemas naturales y humanos. Algunas combinaciones de reglas son derivadas de conjuntos de datos históricos usando diferentes técnicas, como son la extrapolación linear, redes neuronales, algoritmos genéticos, y calibración automática.

Mientras otras técnicas de modelado tradicional ignoran los detalles espaciales, los modelos AC pueden hacer uso explícito de la complejidad espacial. Estos pueden reproducir comportamientos globales realistas y patrones desde simples interacciones locales de células individuales. Los sistemas dinámicos modelados son abstraídos en reglas de transición que permiten relacionar los patrones observados con los procesos en los que estos son gobernados. Por estar razones, se han incrementado los modelos AC diseñados para simular números fenómenos espaciales incluyendo cambios en el uso de suelo, crecimiento

urbano, propagación de incendios forestales y deforestación, competición entre especies y flujo de tráfico.

En estas aplicaciones, el espacio es comúnmente representado por estructuras de células regulares, y la vecindad está definida como una colección de células con base a una adyacencia física. Regularmente, esta configuración se refiere al modelo de datos espacial raster. Sin embargo, actualmente existen modelos con base al modelo de datos espacial vectorial. En ambos casos, la variación del tamaño o resolución de los datos espaciales, puede modificar significativamente los resultados finales. Un factor para lo anterior suceda, es la escala.

En el modelado con AC, el impacto de la variación de la escala en el análisis espacial ha logrado la introducción del uso de otras formas de representación y a su vez a la implementación del paradigma de AC en teselaciones tanto regulares como irregulares.

5.1.4. Diferentes escalas espaciales

Como se mencionó en la sección anterior, las escalas espaciales o escalas en la representación de los datos espaciales es un problema común que enfrentan los modeladores en AC. En [Wolfram, S.,1986], Wolfram introduce el concepto de AC de múltiple escala. Donde, un AC de múltiple escala puede tener múltiples escalas de tiempo, múltiples escalas espaciales o ambos.

La estructura de un AC de múltiple escala

Un AC de múltiple escala o múltiples capas (ACMC) usa una estructura jerárquica, donde las retículas se superponen, pero cada una de ellas puede tener una resolución diferente. Es decir, un ACMC es construido por refinamiento iterativo de autómatas celulares de 2-dimensiones, lo que produce un conjunto de capas conectadas. En un ACMC cada célula en la capa x puede tener exactamente una célula padre en la capa $x - 1$ y un número arbitrario de células hijas en la capa $x + 1$. Estas células son llamadas los “vecinos verticales” de la célula en la capa x .

Dada una capa x en un ACMC, la capa $x + 1$ es construida por una operación llamada “refinamiento”.

Sea $a \times b$ el número de células en nivel x . Sea C_x una célula en el nivel x y C_{x+1} el vecino vertical en el nivel $x + 1$ (ver fig.5.2).

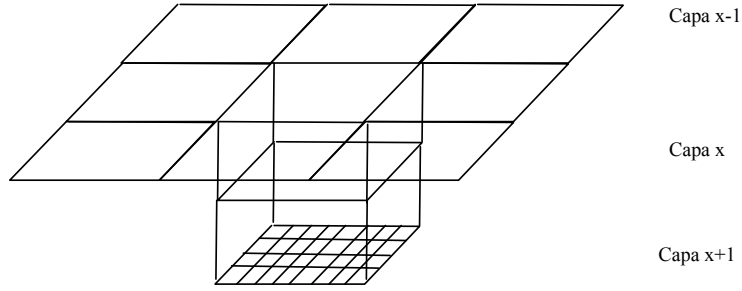


Figura 5.2: Refinamiento y relaciones de las vecindades verticales

- Después del refinamiento, el nivel $x + 1$ tiene $k_{x+1} \cdot a \cdot l_{x+1} \cdot b$ células, y la célula C_{x+1} está dividida en un cuadrícula regular de $k_{x+1} \cdot l_{x+1}$ células $C_{x+1}(i, j), i \in 1, \dots, k_{x+1}, j \in 1, \dots, l_{x+1}$.
- Sea R la relación de vecindad entre las células en el nivel x . Cada célula en el nivel x tiene vecinos adicionales C_{x-1} , y todas $C_{x+1}(i, j)$ (i.e. todas las células tiene un vecino vertical refinado si C_{x+1} existe).

5.1.5. El AC genérico como núcleo del meta-modelo

El núcleo de nuestro modelo, la definición de un AC genérico que se reciba un conjunto de teselaciones, reglas de transición y conjunto de estado, y que como resultado sea una simulación del proceso que se desea estudiar. Sin embargo, un modelo con base en AC no es fácil de implementar. Muchas aplicaciones existentes implementan técnicas eficientes para la investigación de sistemas dinámicos discretos y muchas de ellas hacen uso de los AC. Sin embargo, estas construyen sus métodos de manera independiente, ignorando las ventajas de un SIG. Por otro lado, las ventajas de implementación de manera independiente a incrementado la complejidad de los modelos, y a permitido crear modelos más realistas.

La premisa del AC como núcleo de un modelo genérico recae en la posibilidad de simular modelo dinámicos discretos sin ser expertos en modelos complicados o diseñados para un propósito específico.

Espacio celular

El espacio celular de nuestro modelo consiste en dos tipos de teselaciones regulares de 2-dimensiones (cuadrada y hexagonal). Cada célula de la teselación está definida por un estado de acuerdo a la capa de información espacial. El número de células varía dependiente de la resolución determinado en el modelo espacial. A su vez, el espacio celular puede ser dado por una o muchas teselaciones con la condición que cada célula este alineada con su correspondiente en la teselación sobrepuesta; es decir, esto considera un espacio celular para un AC de múltiples escalas.

La vecindades

La vecindad de una célula está definida por diferentes configuraciones de vecindad (moore, etc.). La configuración de la vecindad se define desde el SIG, sin embargo, se limita a un conjunto de configuraciones posibles. Si bien, nuestro modelo contempla la configuración de una vecindad dada por proximidad o distancia geográfica, en nuestra implementación nos limitamos un conjunto predefinido de configuraciones.

5.1.6. Estados de las células

El estado de cada célula de termina por el conjunto V (conjunto de argumentos) de la modelo espacial. Un estado puede determinarse por un conjunto de datos espaciales (datos numéricos cualitativos o cuantitativos) o bien por un conjunto predeterminado de valores numéricos.

5.1.7. Reglas de transición

Existen muchas reglas transición de AC aplicados en sistemas dinámicos discretos, la definición de las reglas en un modelo genérico es complicado, existen muchas opciones posibles que emular o implementar todas ellas de manera individual es imposible. Por ello, nos limitamos a un conjunto de reglas, sin embargo cabe la posibilidad de diseñar un lenguaje formal que permita describir las reglas y la interacción ellas con los estados de cada célula.

Capítulo 6

Implementación del Modelo GEOSDD

Este capítulo comprende la implementación del modelo GEOSDD (GeoSimulador de Sistemas Dinámicos Discretos) y se presenta el caso de estudio de uso suelo, en particular, la simulación de crecimiento urbano en un área metropolitana. A este sistema lo denominamos como sistema GEOSDD y representa la interpretación del modelo propuesto. En el transcurso de su desarrollo se presentaron las complicaciones de la implementación cualquier modelo de simulación, pero con la dificultad añadida de lograr integrar dos tipos de teselaciones diferentes con el modelado con base en autómatas celulares en un SIG.

6.1. Sistema GEOSDD

Para la implementación del sistema GEOSDD se desarrolló un SIG con un conjunto de datos espaciales, módulos de entrada de datos y visualización. Las funciones espaciales tanto para el modelo espacial y dinámico se implementó dentro de la base de datos espacial como un anexo de funciones adicionales a las ya existentes en el manejador de la BD.

Con la idea de diseñar un sistema acorde al paradigma de los AC y a las características nuestro modelo. Es necesario definir ciertos puntos importantes, principalmente con el objetivo de enfatizar el diseño de un modelo espacio-temporal genérico. En esta sección, abordará los lineamientos en los que el sistema está basado, y una breve descripción conceptual del mismo.

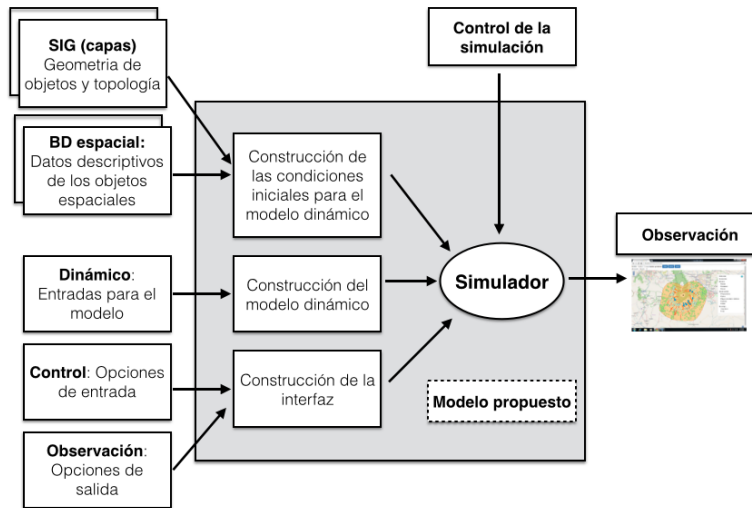


Figura 6.1: Principios de funcionamiento del sistema simulación GEOSDD

6.1.1. Descripción general

El sistema GEOSDD toma en consideración el número de aplicaciones en donde un modelo AC puede ser aplicado, por ello es necesario limitar ciertos parámetros que permitan generalizar y abstraer cierto tipo de sistemas dinámicos discretos. El sistema es propuesto desde dos perspectivas, desde el diseño de un sistema genérico y desde la adaptación del modelo dinámico AC a diferentes reglas de transición y estructuras tesseleadas. En primer lugar, la funcionalidad del sistema es en función de diferentes variables, parámetros, datos, etc., por ello, es necesario entender los principios de funcionamiento de las simulación. Cabe señalar, que estos principios se basan en el modelo espacio-tiempo que se propone. En la figura 6.1 se muestra donde está ubicado nuestro modelo, y principios de funcionamiento relevantes en nuestro diseño para realizar una simulación.

Con base en esto el sistema fue diseñado con el objetivo de simular un caso de estudio, bajo las condiciones de transformación de las teselaciones y las restricciones de un AC genérico.

6.1.2. Metodología

El sistema fue diseñado bajo la metodología de funcionar dentro de la base de datos espacial y su implementación con funciones espaciales en los lenguajes SQL y

PL/pgSQL. El modelo usa dos bibliotecas adicionales: GDAL para importar o exportar los datos espaciales a partir de archivos shapefiles o imágenes (raster), y PostGIS para gestionar los objetos geométricos (puntos, líneas, polígonos) dentro de la base de datos espacial. El modelo fue diseñado y codificado como un conjunto de funciones organizadas en módulos.

1. Funciones de definición: están estrechamente relacionadas con las funciones de transformación del modelo espacial, son aquellas que son asignadas a la definición de los estados por cada estructura topológica generada;
2. Funciones de importación/exportación: funciones que permiten introducir nueva información a la base de datos y que extraen información en los formatos estándares utilizados por la biblioteca PostGIS;
3. Funciones de visualización: están implementadas con el objetivo de enviar al SIG las estructuras sin tener que ser exportadas a archivos para su visualización;
4. Funciones de evolución: Este conjunto se encarga de recibir calcular los estados de transición del AC definido, recibe el tipo de vecindad, la regla, el tipo de estructura y los nombres de dichas estructuras.

6.2. Caso de Estudio: Uso de Suelo

6.2.1. Crecimiento urbano

Como caso de estudio para el modelo dinámico, decidimos implementar el uso de suelo de cierta zona geográfica. Para ello tomamos al área metropolitana de la Ciudad de México área de estudio. Los mapas utilizados tienen datos espaciales organizados en capas de información espacial. La escala de los mapas es de 1:250 000 y los mapas están conformados por áreas urbanas, caminos, agua, bosques, pastizales, agricultura, entre otros. Los mapas fueron obtenidos de las bases de datos libres del INEGI y CONABIO, instituciones nacionales de geoestadística. El histórico de los mapas comprende de los 2001, 2005, 2009 y 2013. La resolución de los mapas se realizó a 1287 x 1228 píxeles, en donde cada capa fue transformada a través de las funciones de transformación del modelo espacial. El modelo fue definido usando los siguientes parámetros:

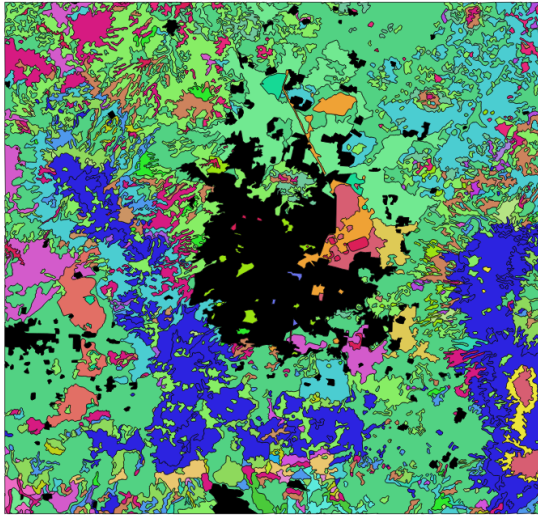
- Se estudiaron diferentes escenarios, modificando los estados y reglas de transición
- Espacio: estructura topológica cuadrada
- Conjunto de estados: se utilizaron dos conjuntos diferentes de estados, que se definirán en las siguientes subsecciones.
- Vecindad: Moore
- Reglas de transición: Dos conjuntos de reglas, el primer conjunto se basa en el AC descrito en [Sharaf, A. et al. 2005] y el segundo, obtenido de las observaciones de los resultados del primer conjunto.

Se estudiaron diferentes escenarios, donde en el período de 2001 a 2009 se utilizó para calibrar los autómatas celulares propuestos. El último período 2009 a 2013 fue utilizado para la validación de los resultados. Los valores iniciales de cada autómata son los datos de entrada del 2001. Entre cada periodo de existe una diferencia de 4 años, por lo cual definimos una resolución temporal de un año por cada etapa de transición. Es necesario remarcar, que se realizaron cambios en las reglas de transición, para poder generar diferentes escenarios de simulación. Pero solo el más sobresaliente para cada escenario.

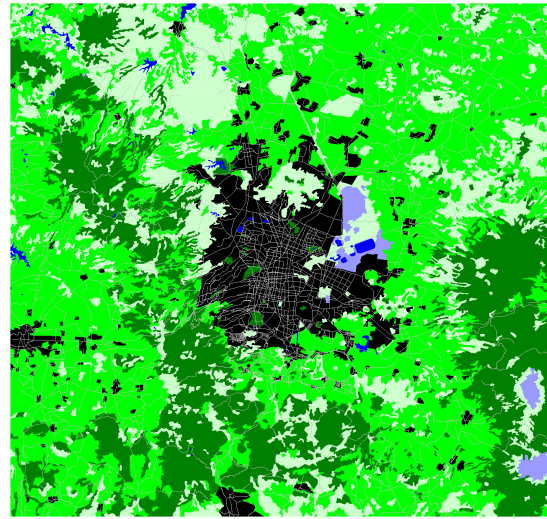
6.2.2. Resultados

Escenario 1

El paso previo a la definición del AC y sus reglas, es definir los estados posibles a partir de las capas de información disponibles. Para ello, fue necesario utilizar el sistema de clasificación de *Anderson*, un sistema de clasificación para abstraer las capas necesarias en la implementación de un modelo de simulación. En principio, este tipo de clasificación se propuso para modelos de datos espaciales raster y establece que cada elemento deberá quedar en el siguiente conjunto de capas: Caminos, Agua, Área urbana, Áreas de cultivo y Pastizales. Sin embargo, los capas adquiridas contenían un mayor rango de datos, además de estar almacenadas en el modelo de datos espacial vectorial. Lo siguiente fue transformar a cada una en una estructura topológica cuadrada, es decir, a un formato tipo raster. De esta manera, la aplicación del sistema de clasificación se facilitó, donde se obtuvieron siete estados posibles (ver fig.6.2).



(a) Capas espaciales (2001)



(b) Capa raster con 7 estados identificados

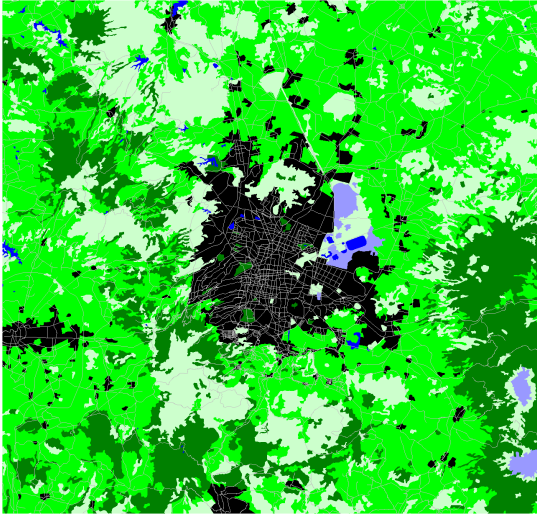
Figura 6.2: Clasificación de 7 estados a partir de las capas históricas (2001)

En la figura 6.2, se visualiza la clasificación de siete estados, de ellos sobresale el del área urbana marcada de color negro. Es necesario indicar que el AC tratará de describir el crecimiento de este estado. Es decir, estudiaremos el crecimiento de la mancha urbana de la Ciudad de México en el período de los años 2001 a 2013.

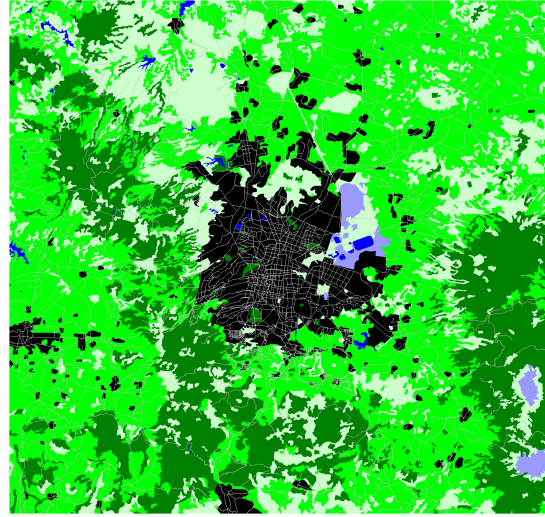
Se definió un autómata celular con un conjunto S de siete estados, $S = \{AreaUrbana, Bosque, Camino, Agua, Pastizal, Agricultura, Riesgo\}$. Con una vecindad tipo Moore R , y con la siguientes reglas de transición.

- Sí la célula bajo consideración es *Agua*, entonces no se permite crecimiento urbano.
- Sí la célula bajo consideración es *Camino*, entonces no se permite crecimiento urbano.
- Sí la célula bajo consideración es *AreaUrbana* o *Riesgo*, entonces la célula permanece sin cambios.
- Sí la célula bajo consideración es (*Bosque* o *Pastizal* o *Agricultura*) y existen 4 células urbanas en la vecindad, entonces la célula cambia al estado de *AreaUrbana*.

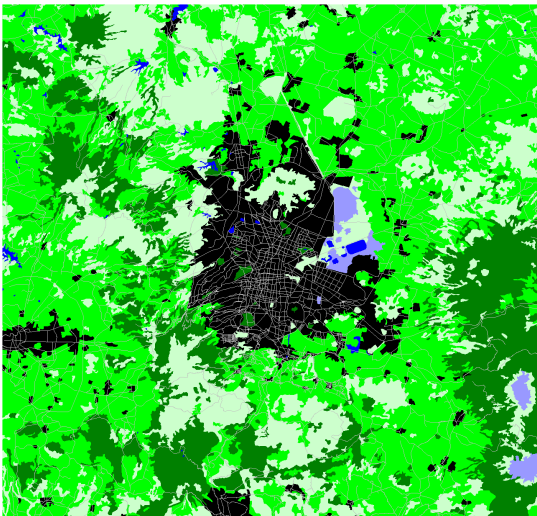
Con esta regla y estados, se obtuvieron las siguientes simulaciones (ver fig.6.3).



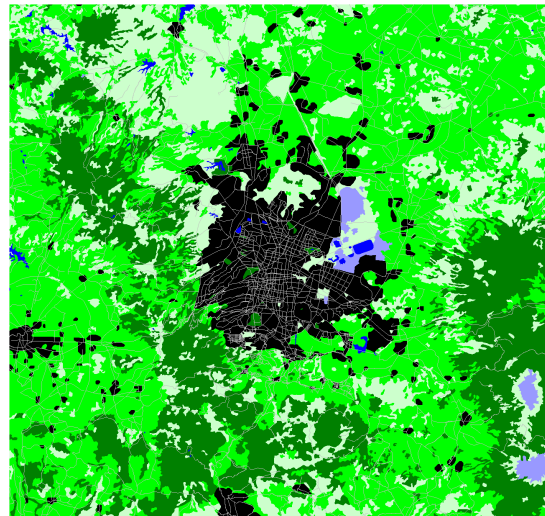
(a) Crecimiento real 2005



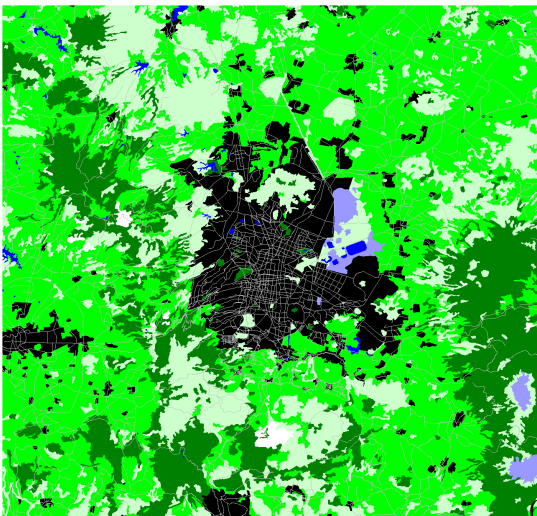
(b) Crecimiento simulado 2005



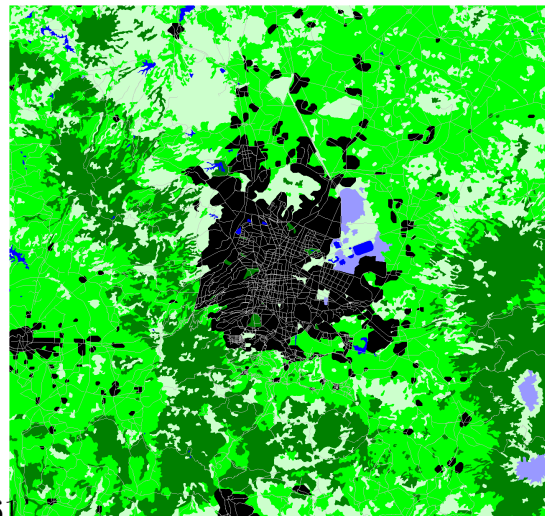
(c) Crecimiento real 2009



(d) Crecimiento simulado 2009



(e) Crecimiento real 2013



(f) Crecimiento simulado 2013

Figura 6.3: Simulaciones obtenidas para el escenario 1

En la tabla 6.1 se resume una comparación de los resultados obtenidos con base al número de células urbanas del crecimiento real con las células de crecimiento simulado.

Cuadro 6.1: Tabla de comparación de número de células en el crecimiento real y simulado (escenario 1).

Período	No. Células Urbanas Reales	No. Células Urbanas Simuladas	Error	Porcentaje
2005	158798	157526	1272	99.1 %
2009	166610	162575	4035	97.5 %
2013	181418	165789	15629	91.3 %

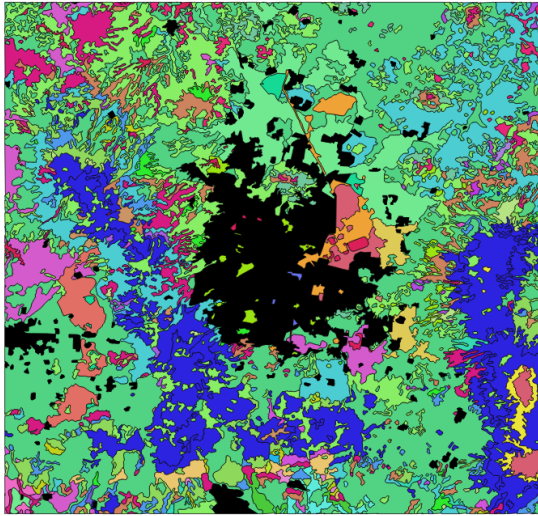
De la tabla 6.1, podemos observar que el AC es capaz de acercarse a la realidad cuando no existe una explotación demográfica poco regular, como es el caso que se ve entre el período 2009 a 2013. Otra observación es el crecimiento de células urbanas en zonas donde en los mapas reales no existen. La razón a lo que atribuimos este crecimiento, es al número de estados donde está permitido haber crecimiento urbano; entre más sea el número de estados de este tipo, se presentará un crecimiento descontrolado.

Escenario 2

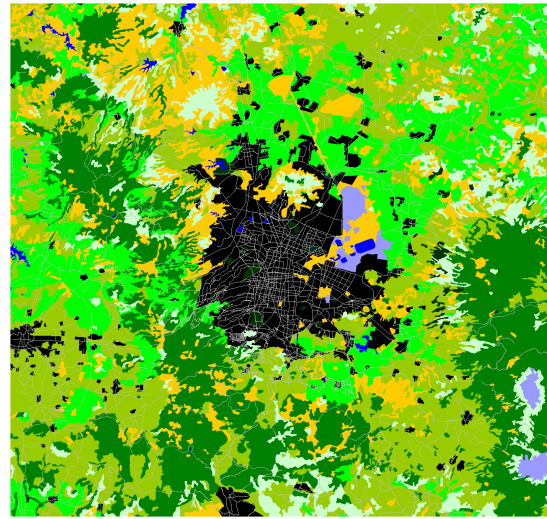
El segundo escenario considera las observaciones de los resultados obtenidos en el primero, por lo cual, la clasificación de capas se hizo más rigurosa y se identificaron 10 estados. Se añadieron nuevos estados apartir de la identificación de zonas protegidas, zonas agricultura permanente y zonas restringidas (ver fig.6.4).

El AC se definió con un conjunto S de diez estados, $S = \{Area Urbana, Bosque, Bosque Protegido, Camino, Agua, Pastizal, Pastizal protegido, Agricultura, Agricultura Permanente, Riesgo\}$. Con una vecindad tipo Moore R , y con la siguientes reglas de transición.

- Sí la célula bajo consideración es *Agua*, entonces no se permite crecimiento urbano.
- Sí la célula bajo consideración es *Camino*, entonces no se permite crecimiento urbano.
- Sí la célula bajo consideración es *Pastizal protegido*, entonces no se permite crecimiento urbano.



(a) Capas espaciales (2001)



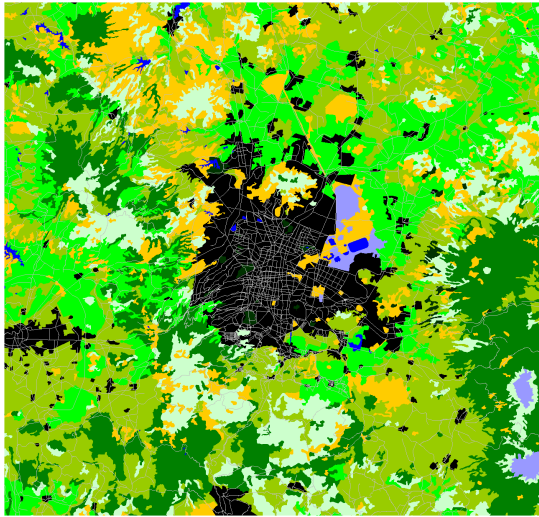
(b) Capa raster con 10 estados identificados

Figura 6.4: Clasificación de 10 estados a partir de las capas históricas (2001)

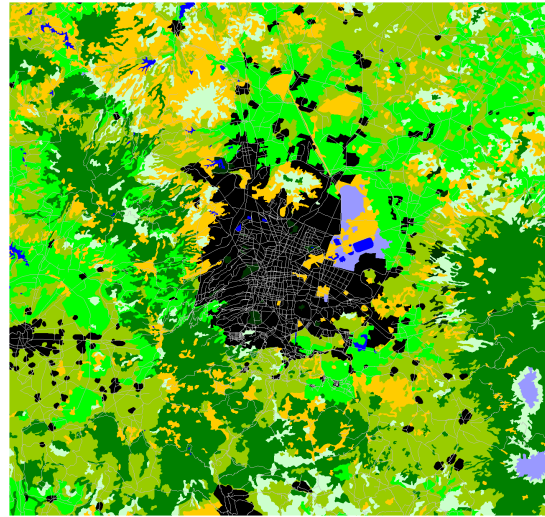
- Sí la célula bajo consideración es *Agricultura permanente*, entonces no se permite crecimiento urbano.
- Sí la célula bajo consideración es *Bosque protegido*, entonces no se permite crecimiento urbano.
- Sí la célula bajo consideración es *Area Urbana* o *Riesgo*, entonces la célula permanece sin cambios.
- Sí la célula bajo consideración es (*Bosque* o *Pastizal* o *Agricultura*) y existen 3 células urbanas en la vecindad, entonces la célula cambia al estado de *Area Urbana*.

Las simulaciones resultantes se muestran en la fig.6.5. De esta figura, podemos observar el el crecimiento de células fue más acelerado, y eso se puede observar con los datos de la tabla 6.2.

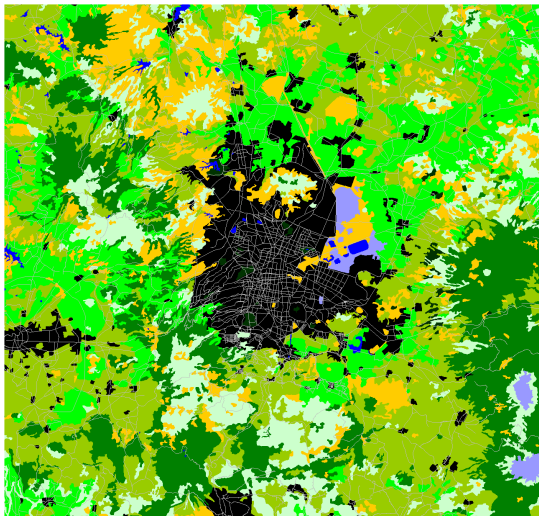
El crecimiento de células que se muestra en los dos primeros períodos es debido al cambio de número de células urbanas en el vecindario. Se puede observar entre 2005 y 2009 tiene una diferencia mucho mayor con la obtenida en el escenario 1 en los mismos períodos, sin embargo, a largo plazo el AC se mucho más al valor esperado. En conclusión,



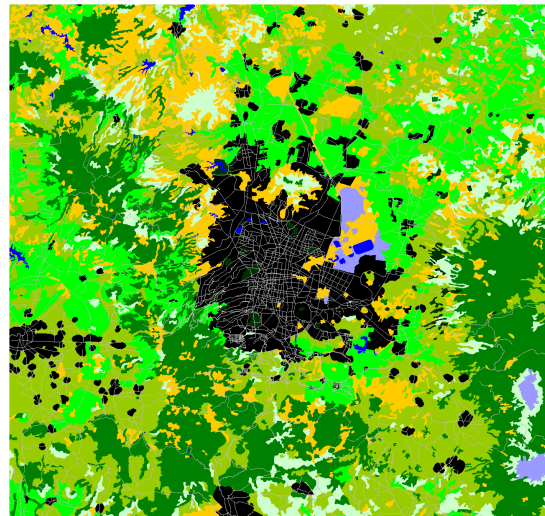
(a) Crecimiento real 2005



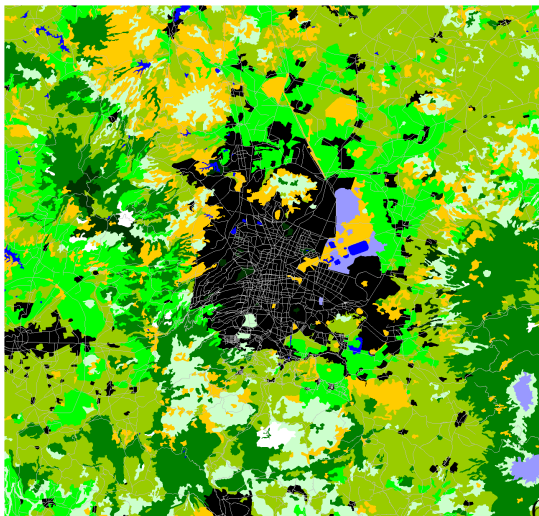
(b) Crecimiento simulado 2005



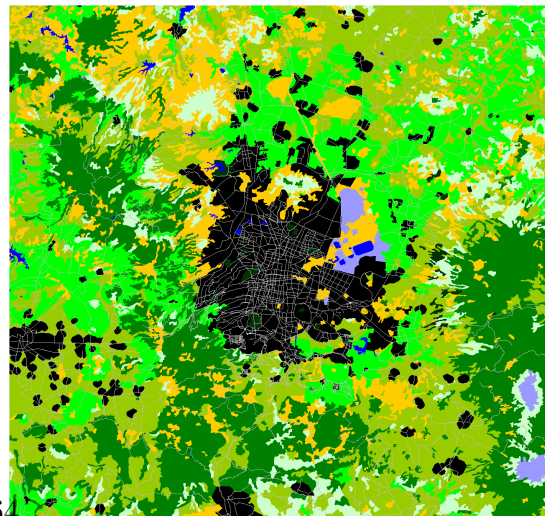
(c) Crecimiento real 2009



(d) Crecimiento simulado 2009



(e) Crecimiento real 2013



(f) Crecimiento simulado 2013

Figura 6.5: Simulaciones obtenidas para el escenario 2

Cuadro 6.2: Tabla de comparación de número de células en el crecimiento real y simulado (escenario 2).

Período	No. Células Urbanas Reales	No. Células Urbanas Simuladas	Error	Porcentaje
2005	158798	161808	-3010	98.1 %
2009	166610	172463	-5853	96.6 %
2013	181418	181936	-518	99.7 %

el AC propuesto en el escenario 1 puede ser útil en simulaciones de corto plazo, mientras el segundo AC sería más eficiente en una simulación de largo plazo.

Capítulo 7

Conclusiones y Trabajo Futuro

La simulación de procesos dinámicos discretos representan un tarea complicada de caracterizar cada comportamiento del sistema. En este sentido, existen muchos modelos espaciales-temporales que intentan proponer características alternas para abarcar el mayor número aspectos del sistema dinámico. En este trabajo, presentamos un modelo, al que lo consideramos como un meta-modelo espacial-temporal, el cual aporta un conjunto de características alternativas para poder simular un rango de sistemas dinámicos discretos que empleen AC y a través de datos espaciales en un sistema de información geográfico. Además, presentamos la base para la desarrollo de un sistema computacional que aportan elementos y fortalecen el desarrollo de la investigación de los sistemas dinámicos discretos desde una perspectiva geográfica (SIG) y de AC.

7.1. Conclusiones

Bajo el contexto de un SIG dinámico, el sistema GEOSDD permite la facilidad de cambiar rápidamente las variables de entrada y la implementación un modelo dinámico donde el modelo esté basado en AC. Estos aspectos hacen al SIG más accesible para lo expertos, dado que se pueden enfocar en la construcción del modelo y no de la manera de trasladar un modelo conceptual a las restricciones impuestas por un SIG.

7.1.1. Modelo GEOSDD

Nuestro modelo GEOSDD es el resultado de una conjunción de herramientas matemáticas y computacionales que pretende cubrir las características de un modelo genéri-

co de simulación (meta-modelo). Algunos de los resultados sobresalientes de este trabajo son:

- Se creó un modelo espacial-temporal para sistemas dinámicos discretos desarrollando un modelado con base a AC con sistemas de información geográfica y utilizando lenguajes de programación dinámica (queries dinámicas) y herramientas para análisis espacial en las bases de datos geográficas.
- Se definió un modelo espacial para SIG que describe la transformación un conjunto de datos geográficos o capas de información espacial en teselaciones equivalentes a esta información.
- Se definió un modelo dinámico que describe un modelo genérico de automata celular, que permite la entrada de teselaciones y donde sus funciones se encuentran definidas dentro el motor de una base de datos espacial.
- Se ha desarrollado un sistema computacional que simula procesos dinámicos como es el crecimiento urbano utilizando información geográfica de uso de suelo.
- La implementación del modelo, es la prueba que es posible integrar un modelo AC dentro de base datos espacial de un SIG.
- Si bien el sistema GEOSDD es limitado, creemos que sus capacidades se pueden extender, proponiendo características adicionales al modelo o bien optimizando las funciones espaciales.

7.2. Trabajo Futuro

Aún existe mucho trabajo por hacer, al principio de esta investigación el modelo abarcaba una mayor gama de aspectos para la simulación de los procesos dinámicos. Sin embargo, la complejidad y el continuo cambio en el modelado, estas funcionalidades se dejaron para un trabajo posterior, sin demeritar los resultados obtenidos. Algunos de estos trabajos que son posibles continuar a la brevedad son los siguientes:

- Añadir al modelo tipos de teselaciones adicionales, lo que permitiría cubrir un mayor rango en el análisis de casos de estudios.

- Implementar el modelo en un Web-SIG, actualmente las funciones desarrolladas pueden ser implementadas en un sistema Web, aunque compartan arquitecturas similares (SIG), es complicado determinar con toda certeza que sea factible. Esto debido que existen factores determinantes en la practicidad del modelo, tales como: como la capacidad de simulaciones concurrentes, velocidad de transferencia de la información, replicación de información, entre otros.
- Analizar casos de estudio similares al crecimiento urbano.
- Concluir con la construcción de un front-end más amigable para el uso del sistema GEOSDD.
- Finalmente, formular un lenguaje propio para el modelo que permita definir las variables y reglas de transición con mayor facilidad.

7.3. Publicaciones

Como resultado de nuestro trabajo de investigación de publicaron los siguiente artículos.

- Bernal, A., Chapa, Sergio V., “*Topology Spatial Model for Dynamic Systems in Geographic Information Systems*”, GeoInformatics 2016, IEEE proceedings.
- Bernal, A., Chapa, Sergio V., “*A Generic Spatial-Temporal Model for Discrete Dynamical Systems using GIS and Cellular Automata*”, GeoInformatics 2017, IEEE proceedings.

Apéndice A

Funciones espaciales para teselaciones cuadradas

```
-----  
-- zModel_Raster(varchar[] [],integer, integer, integer, varchar)  
  CREA LAS CAPAS RASTERS DE LAS VECTORIALES  
-----  
CREATE OR REPLACE FUNCTION zModel_Raster(varchar[] [], integer, integer, integer,  
varchar, varchar)  
RETURNS void AS  
$$  
DECLARE  
  arrtablas ALIAS FOR $1;  
  width ALIAS FOR $2;  
  length ALIAS FOR $3;  
  srid ALIAS FOR $4; -- SRID es el valor de referencia del  
                      -- Sistema de Referencia de Coordenadas  
  pixel ALIAS FOR $5; -- Tipo de pixel '8BUI', etc...  
  nametablefinal ALIAS FOR $6;  
  nametable varchar[];  
  bbox box2d;  
  tipo boolean;  
  i integer := 1;
```



```

BEGIN
-- CREA UN BOUNDING BOX DE REFERENCIA
EXECUTE format('SELECT ST_EXTENT(bbox) FROM zModel_bbox(ARRAY[ $1 ]) as bbox')
    INTO bbox USING arrtablas;

-- CREA UN RASTER DE REFERENCIA
EXECUTE 'DROP TABLE IF EXISTS refraster';
EXECUTE format('CREATE TABLE refraster AS (
SELECT ST_asRaster (
    ST_SetSRID( $1, $2),
    $3,
    ($4 * ( ( ST_YMax(CAST($1 As box2d)) - ST_YMin(CAST($1 As box2d)) ) /
    ( ST_XMax(CAST($1 As box2d)) - ST_XMin(CAST($1 As box2d)) ) ) )::integer,
    ''%s'', -1, -1) AS rast )', pixel) USING bbox, srid, width,length;
-- SE CREA UNA RASTER DONDE SE ALMACENAN TODOS LOS RASTERS
EXECUTE format('DROP TABLE IF EXISTS %s_union',nametablefinal);
EXECUTE format('CREATE TABLE %s_union (rid SERIAL PRIMARY KEY, rast raster)',
    nametablefinal);
-- CREA LOS RASTER DE CADA CAPA
FOREACH nametable SLICE 1 IN ARRAY arrtablas
LOOP
EXECUTE format('DROP TABLE IF EXISTS %I_rast',nametable[1]);
EXECUTE format('SELECT isnumeric(''%s'')',nametable[2]) INTO tipo;
IF tipo IS TRUE THEN
EXECUTE format('CREATE TABLE %I_rast AS
SELECT 1 AS rid, ST_Union(ST_AsRaster(geom, rast, ''%s'', $1, -1)) AS rast
FROM %I, refraster', nametable[1], pixel, nametable[1])
USING nametable[2]::int;
ELSE
EXECUTE format('CREATE TABLE %I_rast AS
SELECT 1 AS rid, ST_Union(ST_AsRaster(geom, rast, ''%s'', %I, -1)) AS rast
FROM %I, refraster', nametable[1], pixel, nametable[2] , nametable[1]);
END IF;
-- SE AÑADEN A LA TABLA DE UNION

```

```

EXECUTE format('INSERT INTO %s_union SELECT $1 as rid, rast as rast
FROM %I_rast', nametablefinal,nametable[1]) USING i;
    i:= i+1;
END LOOP;
-- SE CREA LA TABLA DE RASTER FINAL
EXECUTE format('DROP TABLE IF EXISTS %s',nametablefinal);
EXECUTE format('CREATE TABLE %s AS (
SELECT 1 rid, ST_UNION(rast,''FIRST'') as rast FROM %s_union)',
nametablefinal,nametablefinal);
EXECUTE format('DROP TABLE IF EXISTS %s_union',nametablefinal);
END;
$$ LANGUAGE plpgsql;
=====
-- zModel_ResizeRasters(varchar[],integer,integer) REDIMENSIONA LOS PIXELES
=====
CREATE OR REPLACE FUNCTION zModel_ResizeRasters(varchar[],integer, integer)
RETURNS void AS
$$
DECLARE
arrtablas ALIAS FOR $1; --Nombre de raster a cambiar tamaño de pixeles
width ALIAS FOR $2;
length ALIAS FOR $3;
nametable varchar;
BEGIN
    FOREACH nametable IN ARRAY arrtablas
    LOOP
        EXECUTE format('DROP TABLE IF EXISTS %I_%sx%s',nametable,width,length);
        EXECUTE format('CREATE TABLE %I_%sx%s AS
SELECT 1 AS rid, ST_Resize(rast, $1, $2) AS rast
FROM %I', nametable, width, length, nametable) USING width, length;
        EXECUTE format('UPDATE %I_%sx%s SET rast = ST_SetScale(rast,ref.x,ref.y)
FROM (SELECT ST_ScaleX(rast) As x, ST_ScaleY(rast) As y
FROM refraster ) AS ref;',nametable, width,length);
    END LOOP;

```

```

END;
$$ LANGUAGE plpgsql;
=====
--write_file(param_bytes bytea, param_filepath text) Crea un archivo .tiff
=====
CREATE OR REPLACE FUNCTION write_file (param_bytes bytea, param_filepath text)
RETURNS text
AS $$
f = open(param_filepath, 'wb+')
f.write(param_bytes)
return param_filepath
$$ LANGUAGE plpythonu;
=====
--zmodel_bbox(varchar[]) Regresa un bbox de todas las geometrias
=====
CREATE OR REPLACE FUNCTION zmodel_bbox(character varying[])
  RETURNS SETOF geometry AS
$BODY$
DECLARE
  arrtablas ALIAS FOR $1;
  t varchar;
BEGIN

FOREACH t IN ARRAY arrtablas
  LOOP
    RETURN QUERY
      EXECUTE 'SELECT geom FROM '|| t;
  END LOOP;
END
$BODY$
LANGUAGE plpgsql;
=====
--isnumeric() regresa true si es int o false si es char
=====

```

```
CREATE OR REPLACE FUNCTION isnumeric(text) RETURNS BOOLEAN AS $$
DECLARE x NUMERIC;
BEGIN
    x = $1::NUMERIC;
    RETURN TRUE;
EXCEPTION WHEN others THEN
    RETURN FALSE;
END;
$$
STRICT
LANGUAGE plpgsql IMMUTABLE;
```

Apéndice B

Funciones espaciales para teselaciones hexagonales

```
-----  
DROP FUNCTION IF EXISTS zModel_hexagonal(character varying[], varchar);  
CREATE OR REPLACE FUNCTION zModel_Hexagonal(varchar[], varchar)  
RETURNS void AS  
$$  
DECLARE  
    arrtablas ALIAS FOR $1;  
    tableunion ALIAS FOR $2;  
    t varchar;  
    state integer := 0;  
    bbox box2d;  
BEGIN  
-- CREA EL BOUNDING BOX DE TODAS LAS CAPAS  
EXECUTE format('SELECT ST_EXTENT(bbox) FROM zModel_bbox(ARRAY[ $1 ]) as bbox')  
    INTO bbox USING arrtablas;  
FOREACH t IN ARRAY arrtablas  
LOOP  
    EXECUTE format('DROP TABLE IF EXISTS %I_hex',t);  
    EXECUTE format('CREATE TABLE %I_hex  
        (gid serial not null primary key, state integer)', t);
```

```

EXECUTE format('SELECT
    addgeometrycolumn(''%I_hex'', ''geom'', 0, ''POLYGON'', 2)',t);
EXECUTE format('SELECT genhexagons(0.01,
    ST_XMin(CAST($1 As box2d)), ST_YMin(CAST($1 As box2d)),
    ST_XMax(CAST($1 As box2d)), ST_YMax(CAST($1 As box2d)),''%I_hex'')',t)
    USING bbox;
EXECUTE format('SELECT zmodel_Statehex ( ''%I'',%L)', t, state);
state := state + 1;
END LOOP;
EXECUTE format('DROP TABLE IF EXISTS %I',tableunion);
EXECUTE format('CREATE TABLE %I (gid serial not null primary key, state integer)',
    tableunion);
EXECUTE format('SELECT addgeometrycolumn(''%I'', ''geom'', 0, ''POLYGON'', 2)',
    tableunion);
EXECUTE format('SELECT genhexagons(0.01,
    ST_XMin(CAST($1 As box2d)), ST_YMin(CAST($1 As box2d)),
    ST_XMax(CAST($1 As box2d)), ST_YMax(CAST($1 As box2d)),''%I'')',tableunion)
    USING bbox;
END;
$$ LANGUAGE plpgsql;
--+=====
-- FUNCION zmodel_Statehex: Asigna el un estado de 1-n en el campo "state"
--+=====
DROP FUNCTION IF EXISTS zmodel_Statehex(character varying, integer);
CREATE OR REPLACE FUNCTION zmodel_Statehex( nametable varchar, state integer)
RETURNS void AS
$$
BEGIN
    EXECUTE 'UPDATE '|| nametable ||'_hex SET state='|| state ||'
        FROM (
            SELECT
                '|| nametable ||'_hex.gid
            FROM (
                '|| nametable ||'_hex

```

```
INNER JOIN '|| nametable ||'  
ON ST_Intersects('|| nametable ||'_hex.geom, '|| nametable ||'.geom)  
)  
GROUP BY '|| nametable ||'_hex.gid  
          ) AS temporal  
WHERE '|| nametable ||'_hex.gid = temporal.gid';  
END;  
$$ LANGUAGE plpgsql;
```

=====

Bibliografía

- [Adam y Gangopadhyay 1997] Adam, N. R. y Gangopadhyay A. *Databases in Geographic Information Systems* (Kluwer International Series on Advances in Database System 6). Kluwer, Boston, 1997.
- [Argany, M., et al 2011] Argany, M., et. al., *A GIS bases wireless sensor network coverage estimation and optimization: a voronoi approach*, Transactions on Computational Science XIV, vol. 6970, Lecture Notes in Computer Science, pp. 151-172, 2011.
- [Aronoff, S. 1989] Aronoff, S. *Geographic Information Systems: a management perspective*, WDL. Publisher, Ottawa, 1989.
- [Bak1996] Bak, P., *How Nature Works*. Springer-Verlag. New York. (1996).
- [Batty 1999] Michael Batty & Bin Jiang. *Multi-agent simulation: New Approaches to Exploring*. Centre for Advanced Spatial Analysis University College London. (1999)
- [Benenson2004] Benenson, I. Torrens, P.M., *Geosimulation: Automata-Based Modeling of Urban Phenomena* (London: Jhon Wiley & Sons). (2004).
- [Benenson2002] Benenson, I. Omer, I. y Hatna, E., *Entity-based modeling of urban residential dynamics: the case of Yaffo*, Tel Aviv. Environment and Planning B: Planning and Design, 29, pp. 491-512. (2002).
- [Benenson1998] Benenson, I., *Multi-agent simulations of residential dynamics in the city*. Computers, Environment and Urban Systems, 22(1), pp. 25-42. (1998).
- [Berry 1995] Berry, J.K., *Characterizing and Interacting with GIS Model Logic*, in The CGI Source Book for Geographic Systems, The Association for Geographic Information, London UK, 1995.

- [Birch, C., et al., 2007] . Birch et al., *Rectangular and hexagonal grids used for observation, experiment and simulation in ecology*, Ecological Modelling, vol. 206, issues 3-4, pp. 347-359, 2007.
- [Boccaro, N. 2010] occara, N., *Modeling Complex Systems*. Springer, New York, pp. 6-18, 2010.
- [Burrough y McDonnell, 1998] urrough, P.A. y McDonnell R.A. *Principles of Geographical Information Systems*, Oxford University Press, Oxford., 1998.
- [Chrisman 1977] hrisman, ÒComments on Data Structures to be Discussed at an Advanced Study Symposium on Topological Data Structures for Geographic Information SystemsÓ, *Working Papers from the Advanced Study Symposium on Topological Data Structures for Geographic Information Systems*, 1-15, 1977.
- [Cicone 1977] icone, Richard C. ÒRemote Sensing and Geographically Based Information SystemsÓ, *Proceedings of the 11th International Symposium on Remote Sensing of the Environment 2* pp. 1121-1136, 1977.
- [Clarke1999] Clarke, K.C., *Getting started with Geographic Information Systems*. Prentice Hall. (1999).
- [Cressie2011] Noel Cressie & Christopher K. Wikle. *Statistics for Spatio-Temporal Data*. Jhon Wiley & Sons, Inc. , Hoboken, New Jersey. ISBN: 978-0-471-69274-4. (2011).
- [Cowen 1978] owen, David J. ÒCostal Plains Regional Resource Information System Study: Recent Geographic Information Systems,Ó *Third International Symposium on Computer Assisted Cartography*, 1978.
- [Cressie 2011] ressie, N., y Wikle, C. K., *Statistics for Spatio-Temporal Data*. Jhon Wiley & Sons, Inc. , Hoboken, New Jersey. ISBN: 978-0-471-69274-4, 2011.
- [D'Ambrosio et al. 2003] ?Ambrosio et al., *Simulating debris flows through a hexagonal cellular automata model: SCIDDICA S_{3-hex}*, Natural Hazards and Earth System Sciences, vol. 3, pp. 545-559, 2003.
- [Downing2001] Downing, T.E.; Moss, S.; Pahl-Wostl, C., *Understanding climate policy using participatory agent-based social simulation*. *Multi-Agent-Based Simulation*,

- Lecture Note in Artificial Intelligence 1979.* (ed. Moss, S. y Davidsson, P.), pp. 198-213. Springer-Verlag. (2001).
- [Durfee 1974] urfee, Richard C. *ORRMIS: Oak Ridge Regional Modeling Information System.* Oak Ridge National Laboratory, 1974.
- [Emmott2005] Emmott, Stephen (Microsoft Research) y Stuart Rison. The 2020 Science Group, *Towards 2020 Science: A Draft Roadmap.* Venecia. (2002).
- [Goodchild, M.F. 1989] oodchild, M.F. *The accuracy of spatial databases,* Taylor& Francis, London, 1989.
- [Gold, 1977] old, Christophers M. “The Practical Generation and Use of Geographic Triangular Element Data Structures,” *Working Papers from the Advanced Study Symposium on Topological Data Structures for Geographic Information Systems 1,* pp. 1-32, 1977.
- [Fabrikant, S. I., 2003] abrikant, S. I., *Abstraction and Scale in Spatialization,* in Second National Cartographic Conference, Taupo, New Zealand, pp. 35-43, 2003.
- [Fedra 1993] edra, K., *GIS and environmental modeling. In Environmental Modeling with GIS,* edited by . Goodchild , M. F, Parks, B. O., and Steyaert L. T. (New York: Oxford University Press), 1993.
- [Feng2011] Feng, Yongjiu, et al., *Modeling dynamic urban growth using cellular automata and particle swarm optimization rules,* Landscape and Urban Planning, Elsevier BV. (2011).
- [Fisher, H. T. 1970] isher, H. T. *The use of computer graphics in planning,* Laboratory for Computer Graphics and Spatial Analysis Graduate School of Design, Harvard University, 1970.
- [Foresman TW, 1998] oresman, T. W., *The historical of Geographic Information Systems: perspectives from the pioneers,* Prentice Hall Series in Geographical Information Science, Prentice Hall, Saddle River, 1998.
- [Graz 2012] raz F. Patrick, Westbrooke Martin E., Florentine Singarayer K., *Modelling the effects of water-point closure and fencing removal: A GIS approach,* Multidisciplinary Research Centre, University of Namibia, Namibia, 2012.

- [He 2012] e, Y., et. al., *Three dimensional spatial distribution modeling of soil texture under agricultural systems using a sequence indicator simulation algorithm*.
Department of Soil and Water Sciences, Resources and Environmental Sciences
College, China Agricultural University, Beijing, China, 2012.
- [Huxhold, W.E. y Levinsohn, A.G. 1995] uxhold, W.E. y Levinsohn, A.G. *Managing Geographic Information System Projects*, Oxford University Press, New York/Oxford, 1995.
- [IGU, 1976] GU Commission on Geographical Data Sensing and Processing. *Inventory of Computer Software for Spatial Data Handling*, 1976.
- [Jeldtoft1998] Jeldtoft, Henrik, Jensen., *Self-Organized Criticality Emergent Complex Behavior in Physical and Biological Systems*. Cambridge Lecture Notes in Physics. Cambridge University Press. (1998).
- [Kaashoek1996] Johan F. Kaashoek y Jean H. P. Paelinck., *Potentialised Partial Differential Equations in Economic Geography and Spatial Economics: Multiple Dimensions and Control*, Acta Applicandae Mathematicae 51: 1-23, (1996).
- [Kadiogullari, A., 2015] adiogullari, A., et. al., *Controlling spatial forest structure with spatial simulation in forest management planning: a case study from turkey*, in Sains Malaysiana, vol. 44, no. 3, pp. 325-336, 2015.
- [Kates, R.W., 2012] ates, R.W., *From the Unity of Nature to Sustainability Science: Ideas and Practice*, in Sustainability Science SE-2, Weinstein MP, Turner RE (eds). Springer: New York, pp. 3-19, 2012.
- [Kennedy y Meyers, 1977] ennedy, Michael y Meyers, Charles R. *Spatial Information Systems: An Introduction*, Louisville: Uran Studies Center, 1977.
- [Kong, T.Y. y Rosenfeld, A. 1989] ong, T.Y. y Rosenfeld, A., *Digital Topology: Introduction and Survey*, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Vol. 48, pp.357-393, 1989.
- [Kong, T.Y. et al. 1992] ong, T.Y. , Kopperman, R. y Meyer, P.R. , Guest Eds., *Special Issue on Digital Topology*, *Topology and its Applications*, Vol 46, No. 3, pp.13-303, 1992.

- [Korte, B. 1997] Korte, B. *The GIS Book: understanding the value and implementation of Geographic Information Systems*, 4th. ed- On Word Press, Santa Fe, 1997.
- [Kuznetsov1998] Kuznetsov, Yuri A., *Applied Mathematical Sciences: Elements of Applied Bifurcation Theory*. ISBN: 0-387-98382-1, Springer-Verlag, New York. (1998).
- [Langloise, P., 2009] Langloise, P., Cellular Automata for Modeling Spatial Systems. Wiley-ISTE. *The Modeling Process in Geography: from determinism to complexity*, London, UK, pp. 297-303, 2009.
- [Langloise, P., 2011] Langloise, P., *Simulation in complex systems in GIS*, 1st ed., Wiley-ISTE, Hoboken, NJ, USA, pp. 67-78, 2011.
- [Longley2003] Longley Paul A. , Batty Michael., *Advanced Spatial Analysis*. (2003).
- [Luck2003] Luck, M; McBurney,P.; Preist,C., *Agent Technology: Enabling Next Generation Computing. A Roadmap for Agent-Based Computing*. AgentLink. (2003).
- [Males, 1977] Males, Richard M. ADAPT -A Spatial Data Structure for Use with Planning and Design Models, *Working Papers from the Advanced Study Symposium on Topological Data Structures for Geographic Information Systems 2*, pp. 1-35, 1977.
- [MarBerg2000] Mark de Berg, et al. *Computational Geometry: Algorithms and Applications*, ISBN: 978-3-540-77973-5, Springer-Verlag, pg.148. (2000).
- [Marble 1977] Marble, Duane y Puequet, Donna J. *Computer Software for Spatial Data Handling: Current Status and Future Development Needs*. Buffalo: Geographic Information Systems Laboratory, State University of New York, 1977.
- [Maurer1999] Maurer, Brian, A., *Untangling Ecological Complexity The Macroscopic Perspective*. University of Chicago Press. Chicago & Londres. (1999).
- [Matejicek2002] Matějček L., Benešová L., Tonika J., *Environmental Modelling in Urban Areas with GIS*, Institute for Environmental, Charles University, Prague. (2002).

- [McHarg, 1971] McHarg, Ian L., *Design with Nature*, The American Museum of Natural History, Doubleday/Natural History Press, Doubleday & Company, Inc., Garden City, New York, 1971.
- [Mitchell et al. 1977] Mitchell, William B.; Gupta, Stephen C.; Anderson, K. Eric; Fegeas, Robin G. y Hallam, Cheryl A. *GIRAS: A Geographic Information Retrieval and Analysis System for Handling Land Use and Land Cover Data*, Washington, D. C. : Government Printing Office, 1977.
- [Moreno, N., 2008] Moreno, N., *A Vector-based Geographical Cellular Automata Model to Mitigate Scale Sensitivity and to Allow Objects' Geometric Transformation*, Ph.D. dissertation, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary. Calgary, Canada, 2008.
- [O'Sullivan2001] O'Sullivan, D., *Exploring spatial process dynamics using irregular cellular automaton models*, *Geographical Analysis*, 33(1), pp. 1-18. (2001).
- [Perez 2012] Perez, L. y Dragicevic, S., *Landscape-level simulation of forest insect disturbance: Coupling swarm intelligent agents with GIS-based cellular automata model*. Department of Geography, University of Victoria, Canada, 2012.
- [Peucker, 1972] Peucker, Thomas K. *Computer Cartography*, Washington, D.C.: American Association of Geographers Commission on College Geography Resource Paper No. 17, 1972.
- [Peucker y Chrisman, 1975] Peucker, Thomas K. y Chrisman, Nicolas. *Cartographic Data Structures*, *The American Cartographer* 2, Abril, pp. 55-59, 1975.
- [Peuquet 1977] Peuquet, D. J., *Raster Data Handling in Geographic Information Systems*. Buffalo: Geographic Information Systems Laboratory, State University of New York, 1977.
- [Peuquet 1984] Peuquet, D.J., *A conceptual framework and comparison of spatial data models*, *Cartographica* 21(4): pp. 66-113, 1984.
- [Power, 1975] Power, Margaret A. *Computerized Geographic Information Systems: An Assessment of Important Factors in Their Design, Operation, and Success*, St. Louis: Center for Development Technology, Washington University, 1975.

- [Qi, Y. and Wu, J., 1996] Qi, Y. and Wu, J., *Effects of changing spatial resolution on the results of landscape pattern analysis using autocorrelation indices*, in *Landscape Ecology*, vol. 1, no. 11, pp. 39-49, 1996.
- [Rodriguez2008] Rodríguez, René, *Autómatas celulares y sistemas multiagentes para la modelación de ecosistemas*, Tesis de Doctorado, Cinvestav. (2008).
- [Richardus, P. y Adler, R. K. 1972] Richardus, P. y Adler Ron K. *Map Projections For Geodesists, Cartographers and Geographers*, North-Holland Publishing Company-Ambsterdam.London, 1972.
- [Rigaux, P., et al, 2002] Rigaux, P., et al, *Spatial databases with application to GIS*, 1st ed., Morgan Kaufmann, San Francisco, USA, The Morgan Kaufmann Series in Data Management Systems series, pp. 3-26, 2002.
- [Sahr, K., 2011] Sahr, K., *Hexagonal discrete global grid systems for geospatial computing*, *Archives of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing*, vol. 22, pp. 363-376, 2011.
- [Salmen, et al. 1977a] Salmen, Larry, Gropper, Yames, Hamill, John, y Reed, Carl. *Comparasion of selected Operational Capabilities of Four Geographic Information*, Ft. Collins: Western Governors Policy Office, 1977.
- [Salmen, et al. 1977b] Salmen, Larry, Mutter, Douglas, L., y Burnham, Kenneth. *A General Design Schema for An Operational Geographic Information System For the U.S, Fish and Wildlife Service Region Six*, Ft. Collins: Western Governors Policy Office, 1977.
- [Sharaf, A. et al. 2005] Sharaf, A. et al., *Cellular Automata Urban Growth Simulation and Evaluation - A Case Study of Indianapolis*, *Proceedings of the 8th International Conference on GeoComputation*, University of Michigan, USA, Agosto, 2005.
- [Sammari, H., et al 2012] Sammari, H., et al., *An irregular and multi scale cellular automata tessellation to model surface water flow*, in *Proc. of CAMMUS*, Oporto, Portugal, pp. 221-234, 2012.
- [Schofisch1996] Schofisch, B. and Haderler, K.P., *Dimer automata and cellular automata*. *Physica D*,94, pp. 188-204. (1996).

- [Semboloni1997] Semboloni, F., *An urban and regional model based on cellular automata*. Environment and Planning B, 24, pp. 589-612. (1997).
- [Shi2000] Shi, W. y Pang, M.Y.C., *Development of Voronoi-based cellular automata-an integrated dynamic model for Geographical Information Systems*. International Journal of Geographical Information Science, 14(5), pp. 455-474. (2000).
- [Skopeliti2011] Andriani Skopeliti. *Best practices for polygon generalisation from medium to small scale in a GIS Framework*. National Technical University of Athens, Athens, Greece. (2011).
- [Sousa, L., 2006] ousa, L., et al., *Assessing the accuracy of hexagonal versus square tilled grids in preserving DEM surface flow directions*, in 7th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences, Lisbon, Portugal, pp. 191-200, 2006.
- [Star1990] Star, J.; Estes, J.E., *Geographic Information Systems: An Introduction*. Prentice Hall. (1990).
- [Stewart2000] A. Stewart Fotheringham, Michael Wegener, *Spatial Models and GIS: New Potential and New Models*. Taylor & Francis, pp. 5, 6, 161,162. (2000).
- [Taillandier, P., et al., 2010] aillandier et al., *GAMA: A Simulation Platform That Integrates Geographical Information Data, Agent-Based Modeling and Multi-scale Control*, in 13th International Conference PRIMA, Kolkata, India, 2010.
- [Tom y Miller, 1974] om, Craig y Miller, Lee D. *A Review of Computer-Based Resource Information Systems*. Ft. Collins: Land Use Planning Information Report 2, Colorado State University, 1974.
- [Wahle2001] Wahle, J., Neubert, L., Esser, J. y Schreckenberg, M., *A cellular automaton traffic flow model for online simulation of traffic*. Parallel Computing, 27, pp. 719-735. (2001).
- [Wegener, M. 2000] ichael Wegener, *Spatial models and GIS: new potential and new models*, GISDATA 7 series. pp. 5, 6, 2000.
- [Wolfram, S.,1986] *Theory and applications of cellular automata: including selected papers 1983-1986*: World Scientific, 1986.

[Wolfram, S.,1986] *Approaches to Complexity Engineering, Physica 22D*, 1986. pp. 385-399.

[Wolfram, S., 2002] olfram, S., *A new kind of science*, Wolfram Media, Champaign, IL, pp. 23-39, 2002.

[Worboys, M. F. 1994] ichael F. Worboys, *Innovations in GIS 1*, Taylor &Francis, 1994.

[Zhang2011] Xunruo Zhang, Eric Guilbert. *A multi-agent System Approach for Featuredriven Generalization of isobathymetric Line*. The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong. (2011).