# Centro de Investigación en Geografía y Geomática «Ing. Jorge L. Tamayo», A.C. CentroGeo

# Centro Público de Investigación CONACYT

Reflexiones sobre un Modelo Geoespacial para la navegación terrestre. El caso de México.

# **TESIS**

Que para obtener el grado de: Maestro en Geomática

## Presenta Rodolfo Francisco Javier Sánchez Sandoval

Supervisora principal: *Dra. Elvia Martínez Viveros* Comité supervisor:

Dr. Manuel Ordorica Mellado

Examinador externo: *Mtro. Alberto López Santoyo* 

México, D. F., Septiembre de 2006.

© CentroGeo. Derechos reservados. El autor otorga al CentroGeo el permiso de reproducir y distribuir copias de esta Tesis en su totalidad o en partes.

### Resumen

En esta tesis se hacen algunas reflexiones sobre la navegación, los elementos que demanda y aquellos que coadyuvan en su realización. La determinación de la latitud es relativamente sencilla pero, los instrumentos que permiten determinar la longitud geográfica con alguna precisión aparecen apenas en los siglos diecisiete y dieciocho. Galileo emplea un telescopio para descubrir los satélites de Júpiter y sus ocultaciones y eclipses. Las efemérides de tales ocultaciones permiten sincronizar observaciones de las mismas a distintas horas locales, lo que equivale a determinar la longitud de un punto respecto del otro. Un siglo después, John Harrison inventa un cronómetro cuya precisión lo hace un instrumento confiable para la navegación de aquella época, medio grado de arco, cerca de sesenta kilómetros. Son el telégrafo y los cables trasatlánticos los determinantes de la sincronía y consecuente medición de la longitud con una precisión de segundos de arco.

Los mapas, representaciones icónicas de la superficie terrestre son el instrumento que permite modelar el espacio geográfico y registrar todos aquellos rasgos de la superficie terrestre necesarios para la navegación y otras tareas de carácter geográfico. En los EEUU y en Inglaterra se han desarrollado infraestructuras de datos espaciales que apoyan sus modelos geoespaciales para la navegación

A finales del siglo pasado, el sistema de posicionamiento global finalmente permite determinar la posición geográfica con gran precisión a un costo y con requerimientos mínimos, lo que se conjuga en nuestros días con vastos horizontes para el desarrollo de la Geomática.

Se esbozan las características de los rasgos geográficos y su integración en un modelo geoespacial para la navegación terrestre, con énfasis en las redes de calles y caminos, en términos genéricos, y para tal fín se conjuntan con elementos e ideas de la navegación, la cartografía y el sistema de posicionamiento global. Finalmente, se hacen algunas consideraciones sobre el uso del modelo y sobre su flexibilidad y potenciales para desempeñar tareas en otros ámbitos de aplicación de la geomática.

# Con respeto y afecto:

A quienes se atrevieron a soñar e hicieron de su sueño un CentroGeo...

a quienes compartieron el sueño

a quienes les secundaron en la aventura y están a bordo,

a quienes a distancia comparten suertes,

a quienes para ampliar sus horizontes hacen Geomática,

a quienes se atreven a soñar y a contar cuentos, a hacer ciencia, a hacer Geomática.

### Con mi agradecimiento para:

Elvia, Manolo, Javier, Margarita, Wayne, Fer, Silvana y Alberto, Ben, D.R.F.T., Pepe y Marta.

mis maestros y condiscípulos.

### A Carmita,

a Fito y Pabs,

a Cris, Andy y David; a Pris, a Nena, Sergio, Elsa, Fer, Meche, Juan, Toño, Jorge y los suyos,

con amor.

# Tabla de Contenido

ii
iii
iv
V
vi
1
5
espacio 7 10 15
17
18 24
obal 27
o geoespacial
34
34 36 38 38 ión 40 45 datos, semiología 48 49 . 51 zación 52
54
54 55 57 58 60

# Lista de Figuras

Figura 1.1	La Esencia de la Navegación	9
Figura 4.1	Marco de Conocimiento	34
Figura 4.2	Navegación, ayer y hoy. Instrumentos para la Navegación	35
Figura 4.3	Modelaje Geoespacial	53

### Prefacio.

El CentroGeo tiene, entre otros proyectos estratégicos, el diseño y desarrollo de una "solución compleja de geomática" para un instrumento tecnológico de navegación urbana. Entre los objetivos concretos que contempla el proyecto del Navegador Urbano destaca el de "Diseñar un modelo geoespacial para el instrumento de navegación urbana".

Mis experiencias laborales e intereses académicos me han acercado desde hace más de diez años al tema que he de desarrollar en la presente tesis. Si bien es cierto que en un principio sólo intuía la posibilidad de una cartografía urbana digital de usos múltiples y bajos costos, integrada en un sistema de información geográfica, la situación actual permite contemplar ya la posibilidad de integrar la cartografía en una solución compleja con una faceta geomática y otra cibernética.

Las soluciones complejas en geomática, así llamadas por Reyes, surgen de la inclusión de modelos matemáticos en soluciones empíricas de cibercartografía a problemas planteados por la sociedad, dentro de un marco conceptual derivado de la emergente teoría de la complejidad (Reyes, Taylor, Martínez y López, 2006).

Las soluciones complejas en geomática constituyen el marco donde han de contextualizarse los elementos de información geoespacial para un navegador urbano. El análisis, con carácter reductivo y determinista, de los aspectos fundamentales de la navegación y de los elementos de información geoespacial que un instrumento para la navegación urbana exigen, ha de sintetizarse bajo un enfoque sistémico que permita que dicha información geoespacial sea un común denominador, un núcleo de convergencia de las diversas teleologías que la complejidad del problema conlleva. Para discurrir entre ambos extremos, del reduccionismo a la síntesis holística de las soluciones complejas, la Cibernética, o arte del piloto, será instrumento y objeto de la solución.

### Introducción.

El propósito de la presente tesis, consiste en proponer un modelo geoespacial que permitan conjuntar los elementos necesarios para realizar la navegación terrestre o para coadyuvar a la realización de la misma, en el marco de los paradigmas geomáticos emergentes, un par de experiencias en otros países y las circunstancias locales estimadas relevantes.

J. L. Morrison, (1995:1) en la Conferencia de Cambridge de Organizaciones Cartográficas Nacionales hace un recuento de los grandes paradigmas cartográficos europeos de los últimos cuatro siglos; citando a Brown, (1949: 213, 241) se refiere a los cartógrafos holandeses y flamencos del siglo XVII, herederos de Tolomeo y de la geografía clásica, cuyos mapas, consistentes con el paradigma prevaleciente, eran la suma de la geografía de la antigüedad y de la geografía de sus días. La Académie Royale des Sciences, (en la actualidad el Instituto de Francia), fue fundada en 1666 con el propósito expreso de mejorar y corregir los mapas y cartas de marear. Las actividades de los miembros de la Academia condujeron al uso científico de las herramientas topográficas y a métodos más precisos para cartografíar la superfície de la Tierra. En sus primeros cien años, la Academia trabajó afanosamente para diseñar un método satisfactorio para determinar la longitud. Los cartógrafos comenzaron a producir mapas más precisos que contenían información basada en mediciones científicas. Este fue el cambio paradigmático del siglo XVII inducido por la Academia Francesa, aunque los mapas siguieron siendo mapas impresos de propósitos múltiples.

En los tres siglos siguientes, dice Morrison, la necesidad de posicionamientos precisos y mapas acurados de los territorios nacionales favorecieron la continuación del paradigma de la precisión o el paradigma científico en la cartografía. La guerra se hizo más científica y los armamentos permitieron incrementar las distancias entre los ejércitos beligerantes, haciendo crítica la necesidad de disponer de mapas precisos del propio territorio con fines defensivos y mapas semejantes del territorio enemigo, con propósitos ofensivos. No es sorpresa entonces el surgimiento de organizaciones cartográficas nacionales, no sólo por el valor militar y de interés nacional de la cartografía, sino también por los costos asociados a la producción cartográfica y por la reserva y secrecía que tal información demanda, dado su valor estratégico.

Hasta hace apenas unos años, el paradigma dominante fue la precisión científica de los mapas, expresado en su máximo exponente, la carta topográfica, impresa a escalas intermedias, 1:20,000 a 1:100,000, elaborada por cartógrafos altamente calificados y otros especialistas que hacían uso de valiosos recursos para lograr tal cumbre paradigmática; recursos tales como cuadrillas de científicos, ingenieros y técnicos para establecer y densificar redes geodésicas, aeronaves equipadas con cámaras de formato grande para obtener fotografías aéreas, cuadrillas para hacer verificaciones en campo, especialistas y equipos para fotointerpretación, culminando tanto en la industria editorial y de artes gráficas que la impresión de los mapas requiere como en los procesos de actualización y optimización que el paradigma conlleva.

Empero, en los últimos sesenta años los cerebros electrónicos, eniacs, multivacs y univacs se convirtieron en las PC's y laptops, los Sputniks y Vanguards ahora son satélites, ciertamente artificiales, pero quizá más cercanos y cotidianos que la Luna misma y en palabras de don Samuel Ramos, viejo maestro de ética de la década de los sesentas, "nada hay más democrático que un radio de transistores", transistores de los que nadie se acuerda porque se empacan en términos de potencias de diez en un chip y todo ello ha modificado la cotidianeidad y en particular la cartografía, violenta y profundamente. Son los albores de la revolución tecnológica que nos proporciona teléfonos celulares, computadoras, televisión vía satélite, Internet, catscans o para abreviar, desde America on Line y Apple hasta Windows y workstations pasando por el ciberespacio, la banca electrónica, la inteligencia artificial, Microsoft, MP3, las cámaras sin película, el supermercado con los códigos de barras y cuanto artilugio, instrumento, o ente que herede el apellido Digital y se identifique como producto de la "era de la Información".

Esa revolución no es ajena a la llamada "Revolución Cuantitativa de la Geografía" de la mitad del siglo pasado y que abonó el terreno para tesis como la de C. Reyes, "Un Sistema Generador de Mapas" (1974) sobre la que Thomas K. Poiker (entonces Peuker) dijo: "fue el primer sistema de información geográfica que funcionó", y que constituye una de las primicias de esta revolución o explosión de la ciencia y la tecnología en el ámbito de ese segmento de las mismas al que llamamos Geomática. El sistema de Reyes permite visualizar información tabular a nivel estado o municipio de la República Mexicana sombreando el interior de cada región para obtener una suerte de mapa coropleto que se imprime mediante golpes múltiples, una escala de grises, en una impresora de línea. Diez caracteres por pulgada en los renglones y en la vertical, ocho renglones por pulgada. Constaba de dos mapas base, el estatal y el municipal en los que sólo

cambia el sombreado. El municipal mide aproximadamente 3 x 5 m y se imprime en papel de 15 pulgadas de ancho que deben unirse lado a lado y es un temprano ejemplo de mapa digital.

La cartografía está también sometida a las fuerzas, esbozadas arriba, que se han desatado en los últimos años. Morrison (1995: 2) dice:

"No es sorprendente que los cartógrafos hayan intentado y replicado exitosamente la producción de mapas topográficos impresos a escalas grandes usando tecnología electrónica...

El uso de tecnología digital con propósitos cartográficos, sin embargo, está probando no ser una mera evolución de la vieja tecnología analógica."

No sólo es cierto que la tecnología facilita muchas cosas en la cartografía tradicional sino que también permite hacer cosas nuevas como generalizar una línea usando el método de Douglas-Poiker o hacer acercamientos o panorámicas sobre un despliegue gráfico o emplear otros recursos de la multimedia. De hecho, "la tecnología electrónica es vista ahora como una tecnología de reemplazo de la analógica" (Morrison, 1995: 3). La disminución de los costos de los equipos y programas, su mayor capacidad y velocidad así como la facilidad con que la información cartográfica puede digitalizarse mediante escáneres y mesas digitalizadoras o levantarse directamente de campo mediante receptores GPS, han permitido que transitemos de la "digitalización de la cartografía" a la "cartografía digital", esto es, de replicar la cartografía vernácula, analógica, o tradicional a una nueva cartografía en la que el apellido "digital" no se debe a la mera sustitución del papel por el monitor, sino que refleja un nuevo paradigma, aún emergente y caótico, en el que están por escribirse las normas y estándares. Así, por ejemplo, el valor tradicionalmente asignado a la escala en el mapa por la cartografía convencional se transfiere a una medida de la exactitud o precisión asociada a la posición de un rasgo dada la ubicuidad de la función acercamiento - alejamiento (zoom) en la cartografía digital y con la remoción de la escala de su preeminente pedestal como limitante de muchas características del mapa tales como la selección de rasgos o la generalización de líneas, que eran definidos por el cartógrafo especialista, bajo el nuevo paradigma adquieren grados de libertad insospechados previamente. Bajo el nuevo paradigma cartográfico, cualquiera es cartógrafo, ya que es fácil acceder a fuentes públicas de cartografía digital, es fácil convertir los mapas en papel a formatos digitales, y también es fácil expresar gráficamente el registro de un receptor GPS. La cartografía digital es el radio de transistores de don Samuel Ramos, es la democratización de la cartografía.

En esta tesis se hace una breve recapitulación de la navegación, se presentan sucintamente el marco cartográfico empleado para los censos en los EEUU y la infraestructura de datos espaciales de Gran Bretaña, seguido de los instrumentos de los sistemas de posicionamiento global para sustentar la propuesta de algunos elementos fundamentales en la integración de un modelo geoespacial para la navegación terrestre, con algunas consideraciones relativas a nuestro país.

### Capítulo 1. ¿Qué es navegar?

Navegar trae a la mente numerosas evocaciones, desde las fantásticas aventuras vernianas de la infancia o el sobrenombre de un rey de Portugal, Enrique,"El Navegante", hasta la síntesis del tedio cotidiano del trasladarse al sitio de trabajo, de estudio o de recreo, ya sea caminando o conduciendo un vehículo o simplemente haciéndose conducir, por ejemplo, en algún medio de transporte público.

Navegar es una palabra que, en nuestra cultura, se asocia de manera natural con nave o navío y por consiguiente con el océano y la mar. Su extensión a otros ámbitos, por analogía, resulta también natural. Se habla de navegar en los desiertos, en las llanuras o en el espacio exterior, donde se hace explícito el uso de un vehículo y navegar y nave o navío permanecen unidos en sus orígenes latinos y en su acepción extraplanetaria.

Navegar, nos dice el diccionario, es viajar o ir por el agua en embarcación o nave; ... avanzar el buque o la embarcación;... hacer viaje o ir por el aire en globo, avión u otro vehículo; ... andar de una parte a otra tratando y comerciando; ... transitar o trajinar de una parte a otra; ... conducir las mercaderías por mar de unas partes a otras para comerciar con ellas. (R.A.E., 1992: 1430).

Por analogía, navegamos por aire y tierra, por el espacio exterior, navegamos por los espacios virtuales de la tecnología y abstractos de la matemática y por los recónditos lugares de nuestros espacios interiores. Navegamos con banderas propias y prestadas por nuestra vida y nuestro discurrir y devenir social.

Navegar es gobernar, pilotear, es capitanear, llevar el timón y conducir o guiar; es la forma latina del griego κυβερνητική, cibernética o arte del piloto. Navegar requiere de determinar el curso y la posición de la nave, es saber dónde se está y cómo se está moviendo, saber de dónde se viene y adónde se va. Pero no basta con ello; para navegar es necesario también el poder modificar en alguna medida el curso señalado, es poder dar marcha atrás, volver al punto de partida o cambiar el destino. Así, navegar conlleva dos conocimientos intrincados, entreverados, el primero es

saber dónde se está y adónde se va y el segundo, saber como ir de uno a otro lado. Tras el saber adonde se va está la voluntad y el motivo o el propósito que motivan el viaje; tras el saber dónde se está y como ir al destino designado están, además de la ciencia o el arte del navegar, las limitaciones externas impuestas por el medio y el vehículo.

Quedar a la deriva es dejar de navegar; quedar a merced del viento o de las corrientes, sin una dirección o un propósito, no es navegar. Un paseante en una montaña rusa o un proyectil en vuelo sujeto únicamente a la gravitación y las fortuitas colisiones, no navegan; viajan y se mueven, pero en esencia, no navegan. El antónimo de navegar es ir al garete, quedar a la deriva, ser llevado sin gobierno, sin dirección, sin propósito.

Saber dónde se está y adónde se quiere ir implica, de alguna manera, conocer el aquí, el allá y el hiato o solución de continuidad entre ellos. Cuando el allá está detrás del horizonte, cuando no alcanzamos a verlo desde aquí, el problema de la navegación asume sus verdaderas dimensiones y las ideas asociadas a la navegación se pueden comprender con mayor facilidad en tales condiciones, aún cuando estas sean meramente supuestas.

Si se ha de navegar en dichas condiciones, el saber dónde se está, de dónde se viene y a dónde se va, conlleva la necesidad de representar de alguna manera el espacio en el que ocurre la navegación, en otras palabras, se requiere de un modelo de ese espacio, se necesita de "un mapa".

Es este "mapa", bajo el nuevo paradigma, el objeto central de esta tesis y a él se dedicará la mayor parte del trabajo. Sin embargo, es conveniente aquí introducir también los otros dos elementos necesarios para la navegación. El primero de ellos es el conjunto de ingenios o instrumentos que se requieren para navegar además del mapa y el segundo, es el navegante mismo y sus habilidades.

En el prólogo de su libro, A. Gurney narra, "no sin cierta incredulidad", la historia del costoso yate nuevo que se hace a la mar en una soleada mañana, armado con las tecnologías de punta desde la quilla y el casco hasta la obra muerta, en sus aparejos y en los instrumentos y artilugios de marear: computadoras, radar, sonar, radio guías, giro compases, receptores de posicionamiento global diferenciales y cuanto ingenio de silicio dopado hacía las funciones otrora pobremente realizadas con el auxilio de escandallos y sondas, barquillas y correderas,

brújulas, cartas y tablas, compases, escuadras y paralelas, instrumentos astronómicos y otros, ninguno de los cuales tenía a bordo representación alguna que no fuese digital.

Y continúa narrando como, en su primera travesía de pruebas, caída la noche mar adentro, brumosa, sin luna y sin estrellas, a mitad de la noche un defecto en el sistema eléctrico hace que las pantallas queden en blanco, las carátulas digitales se desvanezcan, los giróstatos se detengan... El cuento termina atribuyendo el mérito del retorno al timonel, quién recordando que la brisa le acarició la mejilla derecha desde la víspera, vuelve a puerto buscando sentir el vientecillo en la izquierda. (Gurney, 2004: 15)

En el resto del Capítulo se emplearán las ideas sugeridas arriba para extender y ejemplificar un poco la perspectiva de los elementos fundamentales para la navegación en los términos navales de siglos pasados por el valor explicativo que poseen y por las analogías que permitirán desarrollar los temas de los siguientes capítulos.

### • El dibujo-mapa o modelo icónico del espacio

El diccionario refiere que en bajo latín, "mappa, es toalla, plano de una finca rústica", y da dos acepciones de interés para mapa: "Representación geográfica de la Tierra o parte de ella en una superficie plana. 2. Representación geográfica de una parte de la superficie terrestre, en la que se da información relativa a una ciencia determinada. MAPA lingüístico, topográfico, demográfico, etc." (R.A.E., 1992: 1319)

Y también refiere que carta de marear o náutica es "el mapa en que se describe el mar, o una porción de él, con sus costas o los lugares donde hay escollos o bajíos" (R.A.E.,1992: 425).

Se menciona arriba que el saber dónde se está, de dónde se viene y adónde se va, conlleva la necesidad de representar de alguna manera el espacio, se requiere de un modelo de ese espacio, se necesita de "un mapa". Aún cuando la definición de mapa del diccionario es a todas luces insuficiente, no se pretende aquí dar una mejor definición, sino apelar nuevamente al lector para que evoque de su experiencia conceptos de mapa propios y más amplios que los mencionados. Por ejemplo, mapa mental, mapa de una función continua o mapa virtual.

Los mapas tradicionales, en una superficie plana, pequeña, como puede ser un papel, son modelos icónicos del espacio. Y más aún, son modelos icónicos de una percepción particular, casi personal y subjetiva de esa realidad. El mapa tradicional obedece a un propósito, y es la visión del hacedor del mapa la que determina las características con que ha de representarse el espacio, o mejor dicho, los rasgos del espacio relevantes para sus propósitos o fines.

Las características intrínsecas del mapa como la escala, la cobertura, el tamaño, el sustrato material que lo soporta, los mecanismos de reproducción, los colores, la proyección empleada, y otras, conllevan y constituyen un universo de posibilidades y limitaciones a los que deben sujetarse el autor del mapa y el mapa mismo. Las características de los rasgos, los elementos propios de la visión o el propósito del mapa constituyen otras limitantes e imponen más restricciones a las posibles alternativas de producción del mapa. De estas líneas y las precedentes se desprende una idea muy sencilla: no es posible hacer un mapa universal; no lo es porque tal mapa debería reflejar todas las visiones, todos los propósitos.

Para navegar se requiere de un mapa del espacio donde se efectúa la navegación. Ese mapa debe reflejar la visión, la perspectiva del navegante; los rasgos del mapa deben reflejar la realidad del navegante. Aquí vuelve a surgir el entreveramiento del conocimiento mencionado antes. Las preguntas ¿Cómo se hace un mapa para navegar en un espacio desconocido, en la mar ignota? y ¿Cómo se encuentra una posición dada de esa mar ignota en ese mapa del espacio? La primera, propia del navegante-descubridor-cartógrafo, y la segunda, del navegante que emplea el mapa para navegar por primera vez tales aguas, son equivalentes. En cierto sentido, hacer un mapa de un espacio desconocido es equivalente a identificar los rasgos del mapa con la realidad de ese espacio desconocido. En ambos casos, tanto el que está dispuesto a explorar y hacer un mapa del espacio desconocido como aquel que dispone de un mapa y navega por vez primera ese espacio, tienen que establecer relaciones unívocas entre los rasgos que el primero ha de dibujar o los ya dibujados en el mapa el segundo, y los elementos, objetos, propiedades, o características del espacio que se navega.

La relación unívoca mencionada anteriormente entre el mapa y el espacio, esto es, a cada rasgo del mapa le corresponde un elemento o característica del espacio, debe ser una relación sencilla o al menos intuitiva en alguna medida. Evitando entrar en detalles, estas relaciones unívocas se reflejan esencialmente en la escala y proyección del mapa y son estas mismas relaciones las que determinan las reglas de equivalencia entre posiciones, distancias y direcciones en el espacio y

en el mapa. Después de la escala y proyección, el proceso conocido como generalización cartográfica es el mayor responsable de establecer las reglas de selección de aquellos rasgos o elementos del paisaje geográfico que han de representarse en el mapa, un modelo estático, icónico, de tal manera que se abstraen algunas rasgos y otros no.

El espacio en el que se hace la navegación es la superficie del planeta, un cuerpo casi esférico en el que tradicionalmente se han empleado dos valores para determinar la posición, latitud y longitud. Smith, (1958, II: 316) dice que Hiparco, alrededor del año 140 A.C., localizaba puntos en los cielos y en la superficie de la Tierra mediante su longitud y latitud, y Eratóstenes (274-194 A.C.) calcula la circunferencia de la Tierra en 250,000 estadios y convenientemente establece que un grado son 700 estadios, o sea un diámetro terrestre de 7,850 millas (12,631 Km.) (Smith, 1958, I: 110).

# Navegador (Propósito) Piloto Posición Vehículo Impedimenta

Por otro lado, para un mapa en un trozo de papel, para la representación icónica del lugar de un rasgo, de manera tradicional, la posición de un punto se determina finalmente mediante

Figura 1.1

coordenadas cartesianas y las mediciones en tal mapa se hacen con una escala y un transportador, instrumentos apenas un poco más modernos que la regla y el compás de la Grecia clásica.

Tras los dos párrafos anteriores se esconden miles de años de tradiciones y culturas, de observaciones y suposiciones, mitos y verdades que poco a poco han permitido acumular un cuerpo de conocimientos, y nos permiten sintetizar el problema: a un punto con una longitud y una latitud dados en la superficie de la tierra corresponde un punto de coordenadas (x, y) en el papel y viceversa.

### • Instrumentos para la navegación.

Aunque la determinación de la latitud se puede hacer fácilmente midiendo la altura de la estrella Polar, la medición de la longitud sólo se puede hacer fácilmente desde mediados del siglo dieciocho con una certidumbre aceptable, ya que es equivalente a determinar la diferencia en la hora entre dos lugares, para lo cual se necesita de un cronómetro, que fue inventado en la segunda mitad del siglo dieciocho. (Smith, 1958, II: 674), (Brown, 1949: 230-240). Al medir la altura de la estrella Polar, no debe olvidarse que ésta describe un círculo y es necesario hacer la reducción al polo. Brown (1949: 207) dice:

"El radio del círculo descrito por la polar se ha hecho más pequeño y por tanto, la corrección es menor. En 1492 la estrella estaba a 3° 39' del polo, el *Regimento* de 1509 lo da como 3° 30'. En 1556 Martín Cortés dijo que se desviaba 3°; Blundeville (1622) lo señaló en 2° 50', el navegador de Bowditch lo da como 1° 42' en 1802. En 1940 la distancia era 1° 02'..."

El problema de interés ahora es qué instrumentos emplea el navegante o el cartógrafo para ubicarse en el espacio. En tierra firme, el topógrafo o viajero pueden contar los pasos o tirar cadenas y mediante visuales, triangular la posición de un punto respecto a rasgos notables para determinar la ubicación en el terreno y en el mapa; pero en el mar el problema es otro tan pronto la costa se pierde bajo o tras el horizonte. En tierra se dispone al menos de una plataforma fija para hacer las observaciones; empero, a bordo de un navío, el movimiento dificulta las observaciones y el uso de un sextante u otro instrumento semejante que sirva para determinar la altura de un astro o el paso del Sol por el meridiano. Cualquier medición que proporcione un buen grado de certidumbre requiere de habilidades físicas así como conocimientos astronómicos

y matemáticos más propios de un geodesta que de un navegante. A estas condiciones deben añadirse las que el tiempo impone; tales como los frecuentes cielos nublados o brumosos y los ya mencionados movimientos del vehículo, por mencionar sólo estos. En síntesis, para determinar la posición en términos de latitud y longitud es necesario determinar la posición en el cielo de algún objeto celeste y mediante algún algoritmo que relacione la posición observada con las efemérides astronómicas, determinar la latitud por un lado y por otro, la hora local, que al compararse con la hora del cronómetro de a bordo permite determinar la diferencia en longitudes entre el lugar donde se está y aquel donde el cronómetro fue puesto a la hora local, o sea, el meridiano origen. Los instrumentos para las observaciones, el almanaque de efemérides, las tablas matemáticas y los conocimientos del navegante no se conjugan fácilmente y sin pagar por ello un precio.

Para sustentar en alguna medida las ideas expuestas en los párrafos anteriores citemos a Brown que dice:

"...la actividad científica a finales del siglo XVII y principios del XVIII era extensa y los problemas tan universales y simples que se dieron muchos descubrimientos e invenciones simultaneas. Cuerpos científicos como la Royal Society en Inglaterra, la Académie Royale des Sciences en Francia, la Académie Royale de Bélgica y la American Philosophical Society estaban activos y los miembros de una sociedad a menudo correspondían con miembros de otras... La rivalidad internacional era intensa y ocasionalmente desagradable, pero en general el efecto en el progreso de la ciencia era benéfico." Brown (1949: 191).

### Más adelante señala:

"Los descubrimientos hechos por la Académie Royale des Sciences marcaron un paso rápido en el mundo científico y señalaron el camino a muchos otros. El método para encontrar la longitud por medio de los eclipses de los satélites de Júpiter había probado ser factible y exacto, pero no fue aceptado sin resistencia por otros países. Las tablas de los satélites de Júpiter fueron finalmente incluidas en el Nautical Almanac inglés y ahí permanecieron en una buena posición por muchos años junto a tablas de distancias lunares y otros datos estelares asociados a métodos rivales para encontrar la longitud. Empero, en general se concedía que Júpiter no podía usarse para encontrar la longitud en el mar, pese a las afirmaciones de Galileo en sentido contrario. Muchos inventores, además del gran italiano, salieron con aparatos ingeniosos y totalmente imprácticos para proporcionar una plataforma estable a bordo desde la cual pudieran hacerse observaciones astronómicas. Pero en los hechos el mar era muy turbulento e impredecible para los astrónomos y sus aparatos. (Brown, 1949: 224)

### Abundando en el tema y el autor citado:

- "...el Parlamento (Inglaterra) paso una ley (1714) para proporcionar una recompensa pública para la persona o personas que descubran la Longitud" Era la mayor recompensa jamás ofrecida y señalaba que para cualquier invención práctica la siguiente suma sería pagada:
  - £ 10,000 por cualquier invento que pueda determinar la longitud con certeza de un grado.

£ 15,000 por cualquier invento que pueda determinar la longitud con certeza de 40 minutos. £ 20,000 por cualquier invento que pueda determinar la longitud con certeza de 30 minutos (2 minutos de hora o 34 millas náuticas)"(Brown,1949: 227)

Y páginas adelante Brown narra como John Harrison, entonces de sesenta y ocho años de edad, decidió no intentar él mismo el largo viaje necesario para la prueba de mar; también decidió apostar todo al desempeño del *Número Cuatro*, en lugar de enviar ambos, el *Número Tres* y el *Cuatro*. El Deptford finalmente salió de Spithead con un convoy el 18 de noviembre de 1761, después de tocar primero en Portland y Plymouth. La prueba de mar se puso en marcha.

"El *Número Cuatro* se había puesto en un estuche con cuatro cerraduras, y las cuatro llaves fueron entregadas a William Harrison, hijo de John, al gobernador de Jamaica, Lyttleton, quién había tomado pasaje en el Deptford, al capitán Digges y al primer oficial. Los cuatro debían estar presentes para abrir el estuche, aún para darle cuerda....

...Los oficiales del Deptford quedaron muy impresionados por las predicciones casi sobrenaturales de Harrison durante el viaje. Aún más cuando arribaron en Jamaica tres días antes que el H.M.S. Beaver que había partido para Jamaica diez días antes que ellos. El Número Cuatro fue prontamente llevado a tierra y verificado. Después de considerar su marcha (2 2/3 segundos de atraso por día en Portsmouth) se encontró que se había retrasado en cinco segundos, un error en la longitud de 1 1/4' nada más, o sea 1 1/4 de milla náutica.

La prueba oficial terminó en Jamaica. Se hicieron arreglos para que William Harrison hiciera el viaje de vuelta en la balandra Merlin, y en un arranque de entusiasmo, el capitán Digges colocó su orden para comprar el primer cronómetro construido por Harrison que fuese puesto en venta. El pasaje de vuelta a Inglaterra fue una prueba severa para el Número Cuatro. El tiempo fue extremadamente tempestuoso y el reloj, aún atendido cuidadosamente por Harrison, tuvo que ser llevado a la chopa, el único lugar seco en el barco donde fue sacudido sin misericordia y "recibió un número de violentos golpes". Sin embargo, cuando fue verificado nuevamente en Portsmouth, el error total para los cinco meses de viaje. A través de calores y fríos, buen clima y malo (y después de compensar por su marcha) fue de apenas 1 minuto con 53 1/2 segundos, o sea, un error en longitud de 28 1/2' (28 1/2 millas náuticas)". (Brown: 234-5)

Con la precisión exigida para otorgar el premio, 34 millas náuticas, sólo se puede navegar a ciegas en menos de la mitad del Mar de Cortés. Entre Picacho San Rafael, al sur de Guaymas, Sonora y la Isla Tortuga en Baja California Sur hay apenas 66 millas náuticas por lo que, si se navega procurando estar equidistante de ambas costas y el error puede ser hasta de 34 millas a uno u otro lado, es posible encallar. Ningún piloto responsable llevaría por allí su embarcación.

Para completar una perspectiva general de la navegación marina, digamos que otras formas de navegar son la navegación impropia, práctica, de cabotaje o costanera que es la que se realiza siguiendo la costa y otros hitos visibles, ya sean faros o boyas. La navegación propia, de altura o astronómica, es realizada mediante la determinación de la altura de los astros y puede ser antigua o moderna. En la antigua se determinaba la longitud mediante las alturas lunares (o los eclipses

de los satélites de Júpiter) y en la moderna, con el auxilio del cronómetro, como se describió antes. Estas formas de navegar obedecen a los recursos empleados para determinar la posición.

Si consideramos los rumbos o derrotas a seguir, la navegación transoceánica puede hacerse de dos maneras. La primera es la navegación loxodrómica que es la que se hace siguiendo un rumbo constante o una curva loxodrómica. Esta sólo fue posible después de la aparición de las cartas de Mercator a mediados del siglo XVI, cuyos antecedentes son los mapas portulanos, que señalaban los rumbos entre puertos. La otra manera es la navegación ortodrómica, o por círculo máximo, que es la que produce la ruta más corta. Cuando se tensa un hilo sobre un globo terráqueo entre dos puntos tenemos algo muy parecido a la ruta ortodrómica. Empero, dada la dificultad que conlleva cambiar el rumbo y determinar la posición instantáneamente a lo largo de toda la travesía, se acostumbra seleccionar unos pocos puntos a lo largo del círculo máximo que une origen y el destino de la travesía y realizar la navegación loxodrómica, siguiendo una derrota, entre puntos sucesivos.

Para completar las ideas expuestas, en términos muy generales y no restringidos a la marina, la navegación se clasifica, de acuerdo a la información empleada para su realización en: 1) pilotaje o basada en la posición, que emplea señales externas que indican la posición y orientación. 2) Navegación basada en la velocidad, o por estima, que requiere señales externas para integrar la rapidez y dirección instantáneas. 3) Navegación basada en las aceleraciones o navegación inercial, lo que requiere una doble integración de datos proporcionados por acelerómetros y giróscopos. En los seres humanos y otras especies, el sistema vestibular del oído medio proporciona información sobre la aceleración lineal y sobre la velocidad y aceleración angulares. Al andar o movernos, hacemos uso de estos tres modos de navegar. (Loomis, 1993: 73).

Pareciera que el problema de la navegación estaba resuelto a finales del siglo XVIII, claro, en la práctica y sólo hasta cierto punto, pero Galison dice que la caza de relojes confiables y transportables continuó a lo largo de los siguientes dos siglos.

"La medición particular que los topógrafos americanos (estadounidenses) más querían era la diferencia entre las longitudes entre el nuevo mundo y el viejo. Pero los cartógrafos simplemente no podían llegar a un consenso. Una desesperada serie de intentos - una entre muchas- comenzó en agosto de 1849, con siete viajes trasatlánticos en cada dirección, cada uno llevando doce cronómetros acurados. La esperanza era que su carga de tiempo mostraría finalmente la verdadera diferencia en tiempo y por tanto, en la longitud a lo ancho del Atlántico. En 1851 metieron a bordo treinta y siete cronómetros aprovechando cinco salidas de Liverpool y dos de Cambridge, Massachusetts. Después de fletar noventa y tres cronómetros a través de los mares, los

astrónomos, de manera optimista proclamaron una diferencia de costa a costa de un vigésimo de segundo. ... La vanagloriada precisión pronto sonó hueca. A pesar de la presencia de solícitos vigilantes de los relojes en los barcos para proteger su carga, la diferencia de tiempo desde los Estados Unidos a Inglaterra era, imposiblemente, diferente a la de Inglaterra hacia los Estados Unidos. Algo en alta mar confundía los relojes. Los astrónomos sospechaban que la temperatura era posiblemente la culpable." (Galison 2003: 102)

En 1866 el *Great Eastern*, un vapor gigantesco completó exitosamente el tendido de un cable trasatlántico, desde Heart's Content, en Terranova hasta Valentia, en Irlanda. Las comunicaciones iniciaron el 27 de julio de 1866. Sin embargo, fue hasta el 11 de diciembre de ese año cuando una súbita helada aisló admirablemente la conexión entre Terranova y Calais en Maine lo que permitió determinar telegráficamente la diferencia de longitudes entre los observatorios de Greenwich en Inglaterra y Harvard, en los Estados Unidos. (Galison, 2003: 134-137).

Con lo anterior quedó resuelto el problema de la longitud en los términos demandados por la cartografía de los últimos doscientos años. Cuando en 1884 se adoptó el meridiano de Greenwich como primer meridiano, ya se habían tendido miles de kilómetros de cables submarinos y determinado telegráficamente la longitud de lugares en todos los continentes habitados.

Retrocedamos a etapas anteriores y retomemos la navegación con pocos recursos. Una solución fácil de concebir, pero no tan simple de hacer funcionar, es la de emplear una brújula o los cuerpos celestes para determinar el rumbo o dirección de desplazamiento y para estimar la velocidad, emplear un reloj de arena y la barquilla y corredera. En otras palabras, la idea detrás de esta opción es la de llevar un registro de la navegación hecha, anotando el rumbo que se ha fijado, el tiempo transcurrido y la velocidad a la que se ha navegado para que al hacer la suma de desplazamientos se sepa cual es la posición. Lo que tradicionalmente los navegantes hacen al llevar una bitácora, es anotar periódicamente el rumbo seguido junto con la distancia recorrida en ese tiempo. Para determinar el rumbo, el piloto ajusta constantemente el timón para mantener la aguja en un ángulo constante respecto a la quilla del barco. Para determinar la velocidad, se tira por la borda la barquilla desenrollando el cordel de la corredera por el tiempo que tarde la arena del reloj en caer; el número de nudos que pasaban en el tiempo señalado corresponde a la velocidad del navío (en nudos, por supuesto). Esta forma de navegar, sucintamente descrita, se conoce como navegación por estima y es aquella en la que la brújula y la corredera son los principales elementos directivos, pero que desde nuestra perspectiva podemos describir como la navegación realizada mediante la integración de la trayectoria mediante una suma vectorial.

En inglés se emplea la expresión dead reckoning para describir la navegación por estima o por puntos estimados. Gurney (2004: 19) dice: "...dead reckoning, or, in the mordant Spanish equivalent, their navegación de fantasía." El Diccionario de la RAE en la red asienta como artículo enmendado el referente a punto, dónde vemos: "punto de estima. 1. m. Mar. El que se coloca en la carta de marear, deduciéndolo del rumbo seguido y de la distancia andada en un tiempo determinado." y poco más adelante: "~ de fantasía. 1. m. Mar. punto de estima ".

El diccionario (Merriam-Webster's Collegiate Dictionary, 2003) refiere dos interpretaciones para "dead reckoning," la primera es determinar la posición de un navío sin el auxilio de observaciones celestes sino mediante el registro de los rumbos seguidos, la distancia hecha y la deriva conocida o estimada y la segunda, "guesswork", esto es, al tanteo, la conjetura, la suposición o la estimación de la posición sin verdaderos conocimientos o razones válidas. (La voz inglesa "dead reckoning" parece tener su origen en la deformación en el habla popular de las palabras "deduced reckoning"). Es esta dualidad de significados la que hace tan llamativa la definición que hace Gurney empleando nuestra lengua, 'navegación de fantasía' que también admite dos interpretaciones. Si fantasía es la "ilusión de los sentidos" nos lleva a la navegación ilusa; si por otro lado asume el valor de "grado superior de la imaginación; la imaginación en cuanto inventa o produce", nos conduce a la navegación fantástica, maravillosa.

### • El Navegante

El espacio donde se hace la navegación es un espacio real, dinámico y de gran complejidad y los modelos empleados para navegar usualmente son estáticos y no reflejan ni la complejidad ni el dinamismo del espacio; por otro lado, las mediciones realizadas para determinar la posición, el rumbo, la velocidad o cualquier otro parámetro conllevan intrínsecamente una indeterminación limitante de la precisión de la medición, por lo que el navegante debe asumir también el papel de piloto, o de timonel, para responder a las condiciones variables del medio ambiente, entre las que destaca el uso que otros navegantes hacen del mismo espacio, los obstáculos naturales o artificiales a la navegación y las condiciones derivadas de las reglas, leyes u ordenamientos que rigen el uso de tal espacio. Bajo el mismo tenor, el vehículo en el que se hace la navegación

también posee características que facilitan o limitan y restringen la navegación y deben por tanto ser consideradas.

Así pues, el papel que juega el navegante no sólo es el de mayor importancia por darle un propósito a la navegación, sino también por las decisiones de índole diversa que ha de asumir durante el proceso de navegar, conducir el vehículo e interactuar con el mismo y el medio ambiente. El navegante ha de conjuntar la información de que disponga, la del modelo, la del vehículo, la del medio ambiente y la de sus fines y propósitos para conducir la navegación satisfactoriamente.

\_\_\_\_\_

Se dice al inicio de este capítulo que navegar es la forma latina del griego κυβερνητική, cibernética o arte del piloto. En el párrafo anterior se mencionan los elementos contingentes de la navegación, que corresponden a la perspectiva de un "mundo entrópico", que coincide con el mencionado por Wiener (1967: 13-21). Pero también se sigue, de lo mencionado hasta aquí, que la navegación es un proceso complejo en el que se manifiestan tanto acciones que obedecen a la previsión de un futuro, llegar a un destino, como reacciones ante un imprevisto, el piloto que corrige o altera el rumbo. Es decir, en la navegación se conjugan la complejidad de sus componentes con su teleología (Figura 1).

\_\_\_\_\_

### Capítulo 2. La cartografía hasta hoy

John P. Snyder (1993: 276) dice en sus conclusiones y prospectiva que:

El mayor énfasis en la computadora no sólo hará más fácil preparar el mapa impreso, también va a eliminar la necesidad de muchos mapas impresos, como Mark Monmonier (1985, 179) lo ha subrayado 'Una víctima temprana de la Transición Electrónica en la Cartografía será la actitud de que el mapa es un producto impreso'.

La idea así manifestada por Snyder y Monmonier es central para el desarrollo de la presente tesis. El no emplear papel sino el monitor de una computadora, de una palm o de un teléfono móvil para el despliegue gráfico del navegador, obedece razones que serán expuestas con mayor amplitud más adelante, pero que ahora pueden intuirse si consideramos la conveniencia de emplear información cartográfica con independencia de la escala y proyección cartográfica fijos que el medio material exige.

Con dicho propósito en éste capítulo describiremos dos marcos cartográficos empleados, el primero, por el Buró de Censos de los Estados Unidos de América, y el segundo, por el Ordnance Survey del Reino Unido, porque constituyen el uno, una estructura sólida para la representación de la cartografía urbana, compatible con la red de calles que será la columna vertebral del sistema para la navegación y con la estructura manzanera usualmente empleada en nuestro medio y el otro, porque respalda una filosofía o actitud promovida en la Octava Conferencia Cartográfica Regional para las Américas para el desarrollo de las infraestructuras de datos nacionales. Los dos constituyen paradigmas que consideraremos fundamentales en la integración del modelo espacial para la navegación que se propone en esta tesis.

### • El Sistema DIME/Tiger

En septiembre de 1966 se estableció el "Estudio del Uso de los Censos" en New Haven, en el estado de Connecticut bajo el patrocinio del Bureau de Censos, con el propósito de explorar los usos actuales y las necesidades futuras de datos en áreas pequeñas y las técnicas para la manipulación y el despliegue de datos en agencias locales, estatales y federales. Se le asignaron objetivos tales como el desarrollo de un sistema que permita interrelacionar eficientemente datos de los Censos con datos locales o estatales para satisfacer necesidades específicas; investigar los beneficios de la cooperación con otras agencias para la colección de datos; investigar el nivel y la forma en que los datos censales deben ponerse a disposición de los usuarios y desarrollar programas de cómputo para el uso de las comunidades locales que permitan la conversión rápida de datos censales en información útil para el análisis local. (USBC, 1970: 2a forros)

Una de las actividades fundamentales del "Estudio del Uso de los Censos", el hacer mapas censales con la computadora, para lo que es necesario un archivo base con coordenadas geográficas que puedan ser asignadas a los archivos censales para hacer los mapas. Como este tipo de archivo no existía entonces para el área seleccionada de New Haven, en el estado de Connecticut, intentaron crearlo a partir de la Guía de Codificación de Domicilios (ACG), empleando alguno de los tres enfoques disponibles: 1) Asignar coordenadas al centro aproximado de una manzana, es decir, a su "centroide"; 2) Asignar coordenadas al centroide de cada cuadra o lado de manzana y 3) Asignar coordenadas a ambos extremos de cada cuadra. Optaron por esta última opción porque permite graficar un mapa de la calle o de la red de calles con propósitos de presentación o de edición. También permite 'sombrear' los valores sobre la configuración de la cuadra, cosas que no pueden hacerse con las dos primeras opciones. Además, es posible obtener los resultados de las primeras dos opciones a partir de la tercera.

Los archivos ACG consisten de un registro para cada lado de cada cuadra de cada calle dentro del área codificada. El archivo contiene sólo las calles y omite otros rasgos tales como límites municipales, ríos y líneas de ferrocarril. El lado de una cuadra es la mitad a uno u otro lado de una calle, entre dos intersecciones consecutivas del lado correspondiente de la calle en cuestión. Cada registro contiene los siguientes campos codificados: Estado, condado, división civil menor (o división censal del condado), lugar, código postal, área censal 1970, calle (incluye dirección

de la misma, nombre, tipo, y un número de serie), mínimo y máximo de la numeración de los domicilios, número censal de la manzana correspondiente, Áreas Estadísticas Metropolitanas Estándar (SMSA), oficina de distrito, código de área (usado en lugar de la división civil menor y lugar, mencionados arriba), código optativo (un código local o un número de serie censal), sección electoral (ward), anexo (área anexada entre los censos de 1960 y 1970), distrito electoral, códigos administrativos de la Oficina de Correos y número de serie (único para cada lado de calle). (USBC, 1970: 3-4).

Para conjuntar la información alfanumérica de los AGC con la correspondiente parte gráfica, se "digitalizaron" algunas partes del área seleccionada de los mapas censales metropolitanos empleando un "localizador de coordenadas" hecho en casa, en la Oficina de Censos. Las coordenadas así obtenidas fueron transformadas al Sistema Estatal de Coordenadas Planas (SPCS) y añadidas a los registros correspondientes en el archivo ACG. El SPSC es un sistema de coordenadas rectangulares, a partir de alguna proyección cartográfica como la transversa de Mercator, la cónica conforme de Lambert o la Hotline oblicua de Mercator y un origen local para cada Estado. Por ejemplo, en Connecticut la proyección es la cónica conforme de Lambert con paralelos estándar  $41^{\circ}12^{\circ}$  y  $41^{\circ}52^{\circ}$  y con origen en el punto localizado en  $72^{\circ}45^{\circ}$  W,  $40^{\circ}50^{\circ}$  N, al que corresponden las coordenadas x = 600,000 ft, y = 0 ft. (Snyder, 1987:51-57).

Pero a partir de este punto los problemas en la implementación fueron muchos. La ausencia de rasgos lineales distintos a calles en el archivo ACG tales como vías de ferrocarril, ríos y riberas de lagos y fronteras municipales, que a menudo cierran las manzanas, imposibilitaron graficar mapas de manzanas o calcular sus áreas. El proceso de digitalización era ineficiente; en cada intersección se hacían ocho lecturas, una para cada lado al fin de la cuadra y por supuesto, la dificultad, ahora bien conocida, de repetir la lectura sobre un mismo punto. Otro problema fue la incapacidad de digitalizar las calles curvas con alguna precisión ya que los ACG sólo codifican los extremos de cada cuadra, lo que ocasionalmente introduce intersecciones inexistentes entre calles. Además, durante las pruebas en New Haven se descubrieron numerosos errores de codificación y muchas omisiones; errores que no se detectaron en las ediciones computarizadas y manuales y que condujeron a la conclusión de que, aunque los ACG eran lo suficientemente precisos para levantar el censo, mejorarlos para otros propósitos tales como el mapeo por computadora no sería práctico. El problema de desarrollar un nuevo sistema fue referido al cuerpo supervisor de las actividades del "Estudio del Uso de los Censos" y se estableció un

subcomité para explorar otros métodos y hacer, si fuese necesario, las investigaciones originales necesarias para desarrollar una base geográfica que pudiera ser usada eficientemente para hacer mapas mediante la computadora y el análisis geográfico. Así, desarrollaron una propuesta para emplear la Teoría de Gráficas como marco conceptual. Es evidente el que un mapa dibujado con líneas sencillas es una gráfica. Cada calle, río, límite municipal, vía ferroviaria, y demás rasgos lineales se representa mediante segmentos lineales. Cada intersección, punto terminal de un segmento aislado, puntos donde la línea cambia de dirección se consideran nodos o vértices. Cada una de las áreas delimitadas por dichas líneas puede ser unívocamente identificada. Los archivos de puntos, de líneas y de áreas pueden relacionarse entre sí empleando algoritmos que se desprenden de la Teoría de Gráficas lo que facilita realizar la edición de los archivos mediante la computadora. (USBC, 1970: 4-5).

El sistema que desarrollaron se llamó Dual Independent Map Encoding, DIME, porque los archivos básicos se crean codificando independientemente dos matrices a partir del mapa fuente.

Un archivo DIME consiste de registros de segmentos. Cada segmento se define como el centro de calle u otro rasgo lineal entre dos vértices o nodos. Además de las calles, los otros rasgos son aquellos rasgos lineales imaginarios que definen fronteras o límites políticos; otros rasgos topográficos tales como ríos, canales y costas, pistas aéreas, muelles y embarcaderos; y cualquier otro rasgo que defina el límite de una manzana. Los nodos son puntos donde los rasgos lineales inician o terminan, se intersecan o donde se introducen para aproximar la curvatura de los rasgos.

Cada segmento se codifica separadamente con los tres códigos necesarios para editar el archivo:

1) el nombre (o número) del segmento que describe el elemento lineal, 2) los números de los nodos inicio y fin del segmento y 3) los números de manzana (área mínima) a la derecha y a la izquierda del segmento (estos tres elementos son obligatorios). Es muy importante señalar que el "nombre" del elemento, los números de nodo y los números de manzana son identificadores únicos, y se comportan como si fuesen números de serie irrepetibles, inmutables e intransferibles.

Usualmente en las calles también se codifica el rango de la numeración a uno y otro lado de la calle. Se codifican estos rangos ya que los archivos DIME serán frecuentemente usados para asignar códigos geográficos a archivos locales de información que contienen como código de localización únicamente calle y número. Hay también otro campo que puede ser usado para

codificar rasgos distintos a calles tales como andadores, como código de localización de lagos y ríos o fronteras. Otros campos adicionales empleados para los archivos de segmentos son los códigos de área postal, el código municipal de área, el número de sección electoral y sector censal. Algunos de los elementos adicionales pueden ser obligatorios bajo ciertas condiciones y otros totalmente opcionales.

Hay dos posibles ediciones topológicas de un archivo DIME. 1) Concatenar los segmentos que rodean una manzana se conoce como encadenar manzanas. Esta edición es la primera en hacerse y es la más importante, ya que detecta la mayoría de los defectos estructurales en el archivo codificado. 2) Concatenar las manzanas que rodean un nodo se conoce como encadenar nodos.

Encadenar una manzana es darle, figuradamente, una vuelta a la manzana empleando la información del archivo. Para ello se seleccionan todos los registros que contengan la manzana de interés a la derecha o a la izquierda de los segmentos. En aquellos registros que la tengan a la izquierda, se invierte la posición de los nodos origen y fin, con lo que la manzana de interés queda a la derecha. Tomando cualquier nodo como origen, se acomodan los registros de tal manera que en el subsiguiente registro el nodo origen coincida con el nodo fin del registro anterior. Para todos los registros que contienen la manzana de interés así ordenados, el primer registro tiene como origen el nodo que es el nodo fin del último registro. Si esto no ocurre así, es necesario rechazar los registros para su revisión. Esto es equivalente a dar una vuelta a la manzana siguiendo la dirección de las manecillas del reloj, con la manzana de interés a la derecha en todo momento, hasta volver al punto de origen.

De manera semejante, para hacer el encadenamiento de un nodo, se seleccionan todas las instancias donde el nodo de interés aparece como inicio o fin de un segmento. Si ocurre lo segundo, se invierte el orden de los nodos y se intercambian también las manzanas de derecha a izquierda y viceversa, quedando el nodo de interés como el nodo inicial en todos los casos. Se acomodan todos los registros con el nodo de interés como nodo inicial de manera tal que la manzana a la derecha del primer segmento o registro es la manzana izquierda del siguiente y así sucesivamente hasta que la manzana derecha del último segmento coincide con la izquierda del primer registro que contiene el nodo de interés. Es equivalente a pararse en el nodo de interés viendo a lo largo de la primera calle, cualquiera que ésta sea, hacia el nodo final de la misma y observando las manzanas a derecha e izquierda de esa calle; Girando en sentido de las manecillas del reloj, al ver hacia el fin de la segunda calle, la manzana que estaba a la derecha en

la observación anterior debe estar a la izquierda y así sucesivamente hasta que la manzana izquierda de la primera observación en el nodo es la manzana derecha del último registro correspondiente al nodo de interés. Si esto no ocurre así, se rechazan los registros correspondientes para su verificación.

Es posible hacer una tercera edición, si se incluyeron los rangos de la numeración de los predios a derecha e izquierda y si dicha numeración posee un buen orden, ya que entonces es posible concatenar una calle de principio a fin mediante la concatenación de los nodos y la posterior verificación del buen orden de los números, que se incrementan o disminuyen regularmente, con los pares a un lado y los nones al otro.

Una vez que los archivos DIME quedan aceptablemente limpios, se les añaden las coordenadas. Aunque el Estudio del Uso de los Censos empleó únicamente el sistema estatal de coordenadas planas, la Oficina de Censos planeó proporcionar los archivos DIME con coordenadas geográficas (latitud-longitud), en coordenadas estatales planas y en "millas mapa" al Norte y Este de un punto arbitrario.

La estructura descrita de los archivos DIME resulta sumamente satisfactoria desde el punto de vista de los usuarios en la realización de censos y su presentación y análisis de resultados. También parece ser satisfactoria para la navegación de los encuestadores censales ya que les permite ubicar cada domicilio en la red de calles. Empero, después de los censos de 1980, tanto el personal de la Oficina de Censos como otros usuarios de la información encontraron problemas en los archivos DIME resultantes fundamentalmente del hecho de que fueron preparados en complejas operaciones realizadas por cientos de personas en distintas oficinas, quienes cometieron diferentes errores en cada producto, lo que condujo a inconsistencias entre los productos finales. Los diferentes procesos empleados para crear los mapas también eran invitaciones a los problemas.

Para evitar los problemas señalados en párrafos anteriores, en 1990 la División de Geografía de la Oficina de Censos desarrolló una nueva estructura denominada TIGER, (Topologically Integrated Geographic Encoding and Referencing) que emplea la solidez de una descripción basada en la matemática para guardar la estructura geográfica de los Estados Unidos. El sistema TIGER adapta ideas de la topología, la teoría de gráficas y de otras disciplinas para proporcionar una descripción matemática de la estructura geográfica de ese país. El archivo TIGER está en el

corazón de la base de datos que relaciona o integra la descripción automatizada de los rasgos. La estructura topológica define la localización y la relación entre calles, ríos y vías ferroviarias entre sí y entre las numerosas áreas para las que la Oficina de Censos produce tablas de datos.

El archivo TIGER es el depósito donde se guarda la descripción automatizada de la estructura geográfica que usa la Oficina de Censos para sus censos y levantamientos. Incluye toda la información de la superficie terrestre que es relevante para los censos. Una de sus metas principales es asegurar la no duplicación u omisión de tales rasgos o áreas.

Entre las áreas políticas enumeradas en los archivos TIGER están 50 estados, 1 distrito federal (DC), 3,231 condados o equivalentes, 275 reservaciones indias, 435 distritos para el congreso, 16,075 distritos escolares y cerca de 37,000 códigos postales. Entre las áreas estadísticas hay 43,383 áreas estadísticas básicas, 102,235 secciones (electorales), 2,545,416 manzanas y del orden de 160,000 zonas de análisis de tráfico. Es interesante considerar que cada una de estas áreas geográficas se integra mediante la conjunción de áreas elementales o atómicas.

La idea central en el acrónimo TIGER es la integración. Esto es lo que hace la diferencia con los sistemas anteriores de la División de Geografía de la Oficina de Censos. La integración no es tarea fácil. Se basa en la red de rasgos físicos y límites no visibles de áreas políticas y estadísticas existentes en los Estados Unidos. Esta información se clasifica como Celdas 0, 1 y 2, como sigue.

Una Celda 0 representa únicamente el punto de intersección de rasgos lineales o el punto final de un rasgo lineal. Los puntos intermedios empleados para describir la forma y otros puntos empleados localmente no constituyen Celdas 0.

Una Celda 1 representa la línea que conecta dos Celdas 0. (La forma de la línea se define por separado).

Finalmente, una Celda 2 representa el área más pequeña, elemental, formada por un conjunto ligado de Celdas 1. Las áreas geográficas, desde una manzana hasta el país entero se definen como conjuntos de Celdas 2.

En el corazón de un archivo TIGER hay tres "listas" (archivos) que contienen cada uno de los elementos topológicos mencionados, las Celdas 0, 1 y 2 y cada lista de Celdas 0 y de Celdas 2

está ligada a un "directorio" (lista) correspondiente de Celdas 0 y Celdas 2. Los directorios se guardan con una estructura de "árbol B", que se utiliza para acceso rápido, optimización del almacenamiento y facilidad de actualización en la computadora. Los directorios contienen el nombre (ID, *handle*, o número de serie único) de la Celda 0 (o centroide de la Celda 2) y la clave de Peano (llamada así en honor al matemático italiano Giuseppe Peano, quién demostró que un espacio bidimensional puede considerarse como una línea unidimensional). Para obtener la clave de Peano correspondiente a un punto, se representan la latitud y la longitud del punto en forma binaria y se intercalan los bits, uno a uno alternadamente, para obtener un solo número binario, que sirve como "llave" en el árbol B mencionado arriba. (Marx, 1986: 181-197)

Los principales problemas que se presentaron con el sistema DIME se derivan de la complejidad de su integración ya que su preparación se realizó en distintas operaciones hechas por cientos de personas que cometieron diferentes errores, lo que llevó a inconsistencias en el producto final. En el TIGER, la estructura topológica que define la ubicación y las relaciones topológicas se integra en una cobertura sin costuras en una misma estructura de cómputo. La topología, la teoría de gráficas y otros recursos matemáticos permiten examinar la consistencia interna de la información.

### • El modelo de la Gran Bretaña

La Base Nacional de Datos Geoespaciales (NGD) es la fuente de la información de referencia definitiva para la Gran Bretaña. Es administrada por el Ordnance Survey (OS) y constituye una parte vital de la Infraestructura de Datos Espaciales, (SDI). Según un informe independiente publicado en 1999, alrededor de 180 mil millones de dólares de actividad económica en el Reino Unido, alrededor del 8% del producto interno bruto, está sustentado en estos mapas. La información geográfica es ampliamente usada por los sectores público y privado. (Lawrence, 2005: 1)

Para el OS, la infraestructura de datos espaciales es el conjunto de datos, tecnologías, habilidades y políticas que permiten a los usuarios acceder a la información geográfica según sus necesidades.

En 1971 el OS inició la digitalización de las 230,000 cartas a gran escala en papel; en 1995 la tarea fue terminada y la Gran Bretaña fue el primer país que entró en la era de los mapas digitales. Los mapas eran versiones electrónicas de sus predecesores, meros dibujos digitales, primera versión de la actual NGD.

La segunda versión derivada de la primera NGD es el llamado Mapa Maestro del Ordnance Survey (OSMM) que comprende cuatro capas interoperables y consistentes que son:

- Topografía. El proyecto se inició en 2001 como resultado de un programa de inversión en la reingeniería de las 230,000 hojas de un formato de dibujo a una base de datos única.
- Domicilios: Contiene los puntos de entrega de 26 millones de direcciones postales .
- Imágenes. Imágenes aéreas a color, con 25 cm. de resolución, ortorectificadas.
- Red de Transporte Integral. Una red de nodos y segmentos para rutas.

El Mapa Maestro contiene cerca de 440 millones de objetos identificados mediante números de referencia llamados TOIDs (IDentificador TOpográfico). Estos identificadores de 16 dígitos son persistentes durante el ciclo de vida del rasgo geográfico correspondiente. Es así como los rasgos pueden compartirse con muchos usuarios en diferentes aplicaciones y sistemas y fueron diseñados para realizar las siguientes funciones:

- Permitir la asociación de información de los objetos del mundo real reduciendo la necesidad de terceros de capturar y mantener la geometría de los rasgos facilitando compartir información entre usuarios del MMOS.
- Hacer referencia de un rasgo del MMOS desde otro rasgo. Por ejemplo, la superficie de una carretera en la capa topográfica se identifica con el rasgo lineal correspondiente en la Red de Transporte Integral.
- Informar al usuario de modificaciones o desapariciones de rasgos para la actualización de la información.
- Hacer referencia a rasgos complejos tales como escuelas o fábricas compuestos de varios rasgos individuales.

Es importante señalar que los TOIDs son en esencia números de serie asignados a los rasgos geográficos por el OS de manera sistemática y consistente pero, a diferencia de la clave de Peano mencionada antes, no se determinan mediante una función sobre las coordenadas geográficas de los rasgos. Los TOIDs son el instrumento que permite emplear los recursos de la tecnología de la información disponibles para ligar bases de datos, compartir información y reducir costos y tiempos.

Los avances realizados por las agencias responsables de la cartografía de nuestro interés en los Estados Unidos y Gran Bretaña desde los años sesentas hasta nuestros días marcan hitos importantes, tanto en el desarrollo de la idea central de considerar fundamental para la estructura cartográfica a la red de calles y otros elementos lineales por un lado, y por otro, en los múltiples problemas encontrados para su implementación.

El tránsito de la estructura DIME original a la TIGER en los noventas y el recorrido por el Ordnance Survey que van de la computadora como depósito de dibujos digitales a mapas con cierta "inteligencia", reflejan la transferencia del énfasis original en la computadora casi como un mero instrumento de dibujo, hasta llegar a los datos y a la información, que con los recursos proporcionados actualmente por la tecnología de la información, se reconocen y manipulan con mayor facilidad al hacer de la computadora una extensión de nuestras habilidades.

Las demandas que los usuarios de las nuevas tecnologías hacen sobre la cartografía se conjugan con sus tendencias históricas para redefinir la cartografía bajo nuevos paradigmas o para comprenderla bajo los paradigmas emergentes de la geomática.

### Capítulo 3. El Sistema de Posicionamiento Global

¿Qué es el Sistema de Posicionamiento Global? La solución a un viejo problema...

GPS - un sistema de navegación global que cualquiera pueden usar.

"Finalmente a alguien se le colmó el plato y dijo: '¡Vamos a tener un sistema que trabaje!'. Ese alguien fue el Departamento de Defensa de los Estados Unidos. Ellos realmente necesitan saber dónde están las cosas (para poder dispararles si tienen que hacerlo) y tienen la clase de dinero necesaria para hacer bien el sistema."

"Así que salieron con algo llamado Sistema de Posicionamiento Global o 'GPS'. Está basado en una constelación de 21 satélites orbitando la Tierra a gran altitud. En cierta manera, puede pensar en ellos como 'estrellas hechas por el hombre' para reemplazar las estrellas que se usaron tradicionalmente para la navegación". (Jeff Hurn, 1989: 7)

Las dos ideas manifestadas por Hurn son centrales para cualquier uso que se le de al Sistema de Posicionamiento Global o GPS y son, por un lado, que el sistema si sirve y permite hacer mediciones de la posición geográfica hasta con errores del orden de centímetros y aún menores, bajo ciertas condiciones, lo que le proporciona un gran atractivo; pero por otro lado, Hurn nos recuerda otra realidad insoslayable, el Sistema está ahí por razones militares.

Los orígenes del GPS se remontan a la radionavegación de mediados de la década de 1920, y más claramente al sistema LORAN (Long Range Aid to Navigation) del Laboratorio de Radiación del Instituto Tecnológico de Massachussets, desarrollado durante la Segunda Guerra Mundial, que utilizaba las diferencias en los tiempos de llegada de señales de radio para determinar la latitud y longitud, aún en condiciones meteorológicas adversas.

El GPS consta de tres elementos separados, conocidos como Segmento Espacial, Segmento de Control y Segmento del Usuario.

El segmento espacial está formado por la constelación GPS, que consta de 24 satélites con órbitas circulares de 10,900 millas náuticas (~20,200 Km.) en seis planos orbitales con una inclinación de 55° con respecto al ecuador y un período de 12 horas siderales. Cada satélite pasa por encima de casi un mismo punto en la Tierra cada 23 horas y 56 minutos. El espaciamiento de los satélites en sus órbitas es tal que por lo menos cinco de ellos están a la vista para los usuarios en cualquier lugar del mundo. (Pace, 1995: 218), (Ashby, 1997)

Los satélites del GPS llevan una carga secundaria consistente en detectores de explosiones nucleares, como parte del tratado de prohibición de pruebas nucleares que los Estados Unidos firmaron con la Unión Soviética en 1963. El Departamento de Energía de los Estados Unidos (DoE) proporciona los sensores. (Pace, 1995: 269).

El GPS de los Estados Unidos proporciona dos servicios de posicionamiento, el llamado Servicio de Posicionamiento de Precisión o PPS para uso de sus fuerzas armadas y sus aliados (que no será mencionado más en lo que sigue), y el Servicio de Posicionamiento Estándar, o SPS, diseñado originalmente para proporcionar a los usuarios civiles una menor precisión. Por instrucciones del Presidente W. Clinton, desde el 1° de Mayo de 2000 se descontinuó el uso del mecanismo empleado para degradar el SPS.

Para dar el Servicio de Posicionamiento Estándar, todos los satélites transmiten la señal L1 en la banda L, polarizada circularmente a la derecha en la banda centrada en la frecuencia de 1572.42 MHz. Contiene el código de Adquisición Cruda (Coarse Acquisition, C/A) modulado en una secuencia pseudo aleatoria (Pseudo Random Noise) PRN de 1.023 MHz, que se repite cada milisegundo. La secuencia PRN es en realidad la suma binaria del código C/A y un mensaje de navegación de 50 Hz.

El mensaje de navegación contiene datos que permiten determinar la hora de transmisión del satélite, la posición, la buena condición operativa y la corrección al reloj del satélite, los efectos de retraso en la propagación, la transferencia de la hora al UTC (USNO) y el statu quo de la constelación. UTC (USNO) es el Tiempo Universal Coordinado de acuerdo al Observatorio Naval de los EE.UU.

(En los satélites los relojes de cesio tienen una precisión de 5 partes en 10<sup>14</sup> por día, equivalente a 4 nanosegundos. La escala temporal UTC (USNO) se basa en arreglo de masers de hidrógeno y relojes de cesio; difiere del Tiempo Atómico Internacional, TAI, de la Oficina Internacional de Pesos y Medidas en París por un número entero de segundos "bisiestos" que UTC incorpora para que su hora corresponda con la rotación terrestre).

La información contenida en el mensaje de navegación es cargada periódicamente por el Segmento de Control, que sigue el curso de los satélites y les proporciona actualizaciones periódicas, corrige sus efemérides y los errores y sesgos de sus relojes. Consta de cinco estaciones automáticas de monitoreo localizadas en Hawai, en la isla de la Ascensión (Atlántico

ecuatorial), en Diego García (Océano Indico), en Kwajalein (Micronesia) y Colorado Springs, Colorado. Las mediciones hechas en cada estación se envían al Centro de Operaciones Espaciales Consolidadas (CSOC) en Colorado Springs para determinar las efemérides y errores en los relojes de cada satélite. Tal información se envía a los satélites una vez al día mediante antenas terrestres localizadas alrededor del mundo.

La localización de cada una de las estaciones mencionadas se conoce con gran exactitud y como cada una está provista de un reloj atómico de cesio, permiten emplear las mediciones hechas por cada estación para un satélite determinado para determinar su localización en el espacio y la hora en su reloj. Los relojes de la constelación están sincronizados.

Inocente frase: "los relojes están sincronizados." Pero también se sincronizaron a uno y otro lado del Atlántico mediante la observación de los satélites de Júpiter, mediante el cronómetro de Harrison, hace ciento cincuenta años usando un cable telegráfico, y hace alrededor de un siglo, cuando A. Einstein despachaba en la oficina de patentes recibió solicitudes de patentes con esquemas para sincronizar la medida del tiempo por medio de señales de radio. El Sistema de Posicionamiento Global sincroniza sus relojes con un error medio inferior a 50 nanosegundos (50 x 10<sup>-9</sup> s) por día. (Galison, 2003: 288)

Los receptores del GPS y las antenas y equipos auxiliares constituyen el segmento usuario del Sistema de Posicionamiento Global.

El uso del código pseudo aleatorio permite hacer dos cosas muy importantes. La primera es que, pese a que la señal es de muy baja potencia, apenas del orden de 20 W, lo que hace que la intensidad de la señal sea muy similar a la intensidad del ruido electrónico de fondo del segmento usuario. Sin embargo, el código pseudoaleatorio permite distinguir el mensaje del ruido de fondo. El código de cada satélite está en la memoria del receptor y este lo replica empleando su propio reloj. El tiempo transcurrido entre la ocurrencia de ambos códigos permite calcular la distancia entre el satélite y el receptor, asumiendo que los relojes en ambos estén perfectamente sincronizados, lo cual, en general, no esperamos que ocurra.

Si todos los relojes fuesen sincrónicos, el problema se reduce a encontrar el círculo donde se intersecan digamos empleando dos satélites, dos esferas y el nivel del mar, o bien con tres satélites, los puntos donde se intersecan tres esferas. Pero, el reloj del receptor no está sincronizado con los satelitales, así que se emplean cuatro o más satélites y algún método

numérico para encontrar una solución al sistema de ecuaciones derivadas del producto de la velocidad de la luz por el tiempo transcurrido, para cada satélite.

En términos matemáticos: Sean cuatro relojes sincrónicos trasmitiendo desde posiciones  $\mathbf{r}_j$  en tiempos  $\mathbf{t}_j$ , con j=1, 2, 3, 4. Suponga que las cuatro señales se reciben en la posición  $\mathbf{r}$  en el instante  $\mathbf{t}$ . Entonces, :

$$\mathbf{c}^2 (\mathbf{t} - \mathbf{t}_i)^2 = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|^2$$
, donde  $\mathbf{c} = 299,792,458$ . m s<sup>-1</sup>

que debe resolverse para {r, t}. (Ashby, p.6, 2003).

Afortunadamente, el usuario de un receptor de uso civil del sistema GPS sólo tiene que leer la pantalla del instrumento o el monitor del equipo dónde esté instalado.

Galison (2003: 288) dice:

"De acuerdo a la relatividad (*especial*) los satélites orbitando la Tierra a 12,500 millas por hora tienen relojes que se atrasan (respecto a la Tierra en 7 millonésimas de segundo por día. Hasta la relatividad general (teoría de la gravedad de Einstein) tuvo que programarse en el sistema. A once mil millas en el espacio, dónde los satélites orbitan, la relatividad general predice que en un campo gravitacional más débil, los relojes se adelantarían 45 millonésimas de segundo por día. Esas dos correcciones suman, sorprendentemente, una corrección de 38 millonésimas de segundo, (esto es, 38,000 nanosegundos) por día en un sistema que debe mantener una exactitud dentro de los 50 nanosegundos por día."

Sobre este mismo punto Ashby (2003) dice:

"Cuando fue lanzado el satélite NTS-2 (junio 23 de 1977) que contenía el primer reloj atómico de cesio que sería puesto en órbita, era sabido que los relojes en órbita podrían requerir una corrección relativista, pero había incertidumbre sobre su magnitud y su signo. Efectivamente, había quienes dudaban de que los efectos relativistas fuesen verdades que debían incorporarse. Se construyó un sintetizador de frecuencia en el sistema de relojería del satélite de tal modo que, después del lanzamiento, si el paso del reloj ya en órbita final era, de facto, lo predicho por la relatividad general, entonces el sintetizador sería puesto en marcha para hacer que el paso del reloj quedase coordinado para la operación. Después de poner en marcha el reloj de NTS-2, operó por alrededor de veinte días para medir el paso antes de encender el sintetizador."

Después de esta somera descripción del sistema, se retoma la historia del mismo para señalar algunos hitos de gran importancia para los propósitos de este trabajo ya que puede objetarse la dependencia que conlleva su uso.

Después de que el vuelo 007 de Korean Air Lines fue derribado por un avión soviético, el presidente Reagan ofreció poner el GPS a disposición de la aviación civil, libre de costos,

cuando el sistema se hiciera operacional. Este hecho marcó el inicio del tránsito de la tecnología del ámbito militar al civil. En 1987 el Departamento de Defensa solicitó formalmente que el Departamento de Transporte asumiera la responsabilidad de establecer y proveer una oficina para responder a los usuarios civiles. En 1989 la Guardia Costera asumió la responsabilidad de ser la agencia líder para el Servicio GPS Civil.

Los primeros usuarios civiles fueron los topógrafos, quienes hicieron despegar el mercado de los GPS comerciales. Debido al pequeño número de satélites en órbita de la constelación que se estaba desplegando, los topógrafos desarrollaron algunas técnicas para mejorar la exactitud de sus mediciones, entre ellas, el GPS diferencial. (Esencialmente consiste en tener un receptor GPS fijo y llevar un registro de las diferencias entre la posición conocida y la determinada mediante el empleo de las diferentes combinaciones de satélites visibles. Estas diferencias se emplean para corregir las posiciones obtenidas mediante receptores GPS móviles empleando los mismos satélites y a la misma hora. Originalmente esto se hacía en gabinete, a posteriori, pero actualmente puede hacerse en tiempo real si la estación fija radia la información y la móvil conjunta esta información con la de los satélites).

En agosto de 1990, durante la Guerra del Golfo Pérsico, la degradación SA fue desactivada porque había muy pocos receptores de precisión y los militares decidieron comprar miles de aparatos de uso civil.

En septiembre de 1991 los Estados Unidos ofrecieron el Servicio de Posicionamiento Estándar (SPS) a la comunidad internacional, de manera continua y con cobertura mundial, sin cargos directos por un mínimo de diez años, a partir de 1993. Un año después ampliaron la oferta haciéndola por tiempo indefinido y comprometiéndose a dar aviso con seis años de anticipación de la terminación del servicio.

El 8 de diciembre de 1993 el secretario de Defensa declaró la Capacidad Operacional Inicial del GPS, lo que se tradujo en 24 satélites en órbita, con 100 m de precisión.

En marzo de 1995, el Presidente W. Clinton reafirmó el compromiso de proporcionar el servicio GPS a la comunidad civil internacional. La política autorizada por el Presidente de los EE. UU. el 8 de diciembre de 2004 y publicada el 15 del mismo mes y año bajo el título "U.S. Spacebased positioning, navigation, and timing policy" establece una serie de compromisos que amplían y mejoran para los usuarios extranjeros, civiles, comerciales y científicos, las

condiciones de operación y uso del sistema GPS. Entre los cambios que ésta nueva política conlleva destacan la desaparición de la disponibilidad selectiva (SA), lo que produjo un incremento en la exactitud con los mismos equipos receptores. Según el estándar publicado por el Departamento de Defensa (DoD, 2001: 15) la exactitud promedio global, en la horizontal es  $\leq$  13 m, la vertical  $\leq$  22 m, en el peor sitio corresponden a  $\leq$  36 m y  $\leq$  77 m, horizontal y vertical respectivamente y el error en el tiempo es  $\leq$  40 nanosegundos, todo ello dentro del 95% del tiempo, en un intervalo de 24 horas para el promedio de todos los puntos dentro del volumen de servicio (toda la superfície del planeta hasta 3,000 Km. de altura).

La Unión Europea que en 1999 decidió instalar un servicio de posicionamiento global con nombre Galileo, interoperable con los sistemas existentes. El sistema consistirá de 27 satélites operacionales y tres en reserva en tres planos orbitales con 56° de inclinación nominal y espaciados 40° entre ellos a 23,222 Km. de altitud.

Cada satélite Galileo va a transmitir 10 señales diferentes para poder ofrecer un servicio abierto (OS), uno de Seguridad de Vida (SoL), uno comercial (CS) y uno público regulado (PRS). Galileo prestará un soporte al Sistema Internacional de Satélites para Búsqueda y Rescate (COSPAS/SARSAT) ya que los satélites serán capaces de recoger las señales de los radiofaros de emergencia que llevan barcos, aviones y aún personas, para enviarla a los centros nacionales de auxilio, prácticamente en tiempo real; en algunos casos será posible retroalimentar al radiofaro emisor informándole que el auxilio ya está en camino. (ESA, 2005)

Una razón para las muchas señales es que el uso de dos o más señales permite cancelar el error producido en la ionosfera lo que puede explotarse en aplicaciones muy precisas a nivel de centímetro. Además, la señal está modulada para evitar interferencias, lo que permite compartir la frecuencia con el GPS sin interferirse mutuamente, lo que también facilita la construcción de receptores que operen en ambos sistemas simultáneamente.

El 26 de septiembre de 2005, CNN reportó que un cohete llevaba un nuevo satélite GPS al espacio. El satélite construido por Lockheed Martin, llamado GPS IIR-M es el primero en una serie de ocho que proveerán señales más fuertes, mejor protección contra interferencia y señales adicionales para los usuarios. "Esta será la primera vez que se añade una segunda frecuencia para uso civil", dice la nota periodística. Parece ser una respuesta competitiva al sistema Galileo.

Otro sistema satelital es el ruso GLONASS (Globalnaya Navigationnaya Sputnikovaya Sistema) que opera desde 1996. Cuenta también con dos frecuencias, una de uso militar y otra de uso civil. Para este último, la exactitud es de 26 m en la horizontal y 45 en la vertical. Aunque originalmente el sistema debía integrarse con 24 satélites, el GLONASS ha tenido problemas financieros y en febrero de 2004 sólo 9 satélites seguían activos. (Schiller, 2004: 191).

Los sistemas de posicionamiento mediante el uso de señales de cronómetros sincronizados a bordo de satélites en órbitas muy bien definidas, permiten la construcción de instrumentos receptores capaces de determinar su posición con errores entre los cincuenta metros y algunos milímetros, todo ello en un instante. Estos instrumentos resuelven un problema cuya solución era un sueño inasible hace apenas una generación, o menos.

El problema que los sistemas de posicionamiento global resuelven no es exclusivo de la navegación o la cartografía. -¿Qué?, ¿quién? y ¿cómo?- seguirán teniendo las respuestas que siempre han tenido pero -¿cuándo? y ¿dónde? pueden hoy obtener respuestas del GPS que ayer se considerarían imposibles o impensables.

# Capítulo 4. Marco de conocimiento del modelo geoespacial para la navegación terrestre

# Aspectos teóricos.

El Capítulo 1 extrae la esencia de la navegación y la considera fundamentalmente constituida por el navegante/piloto, con su vehículo e impedimenta, quien mediante la determinación de su posición en el terreno y el mapa, puede realizar la navegación y nos permite dibujar un marco de conocimiento de los datos geoespaciales necesarios para la navegación.

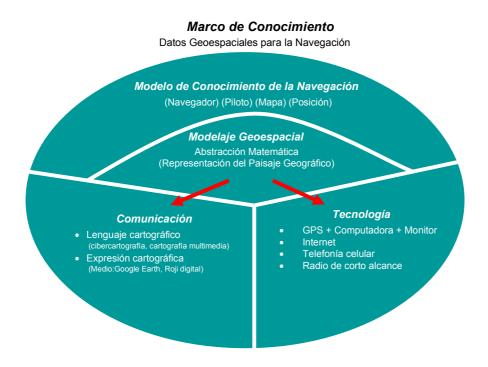


Figura 4.1

Los Capítulos 2 y 3 describen el contexto conceptual para proponer un modelo geoespacial sustentado en las experiencias del sistema cartográfico empleado por la Oficina de Censos de los EEUU y por el modelo que se está implantando en el Reino Unido. El modelo geoespacial para

la navegación terrestre se deriva del modelo de conocimientos de navegación. Los otros dos componentes, Comunicación y Tecnología, son también partes fundamentales del marco de conocimiento y como indican la flechas de la figura, son considerados y se hacen referencias a ellos, pero no se profundiza o abunda en los mismos (ver Figura 4.1).

# Navegación, ayer y hoy Ayer Hoy Navegante/piloto • Navegante/piloto "Mapa" del territorio Mapa de la mar océano Representación icónica Representación icónica Mapa virtual Representación geo-matemática Representación geo-computacional Referencia a autor o fuente • • • • • Metadatos Re-edición de cartas • • • Actualizaciones Conocimiento del navegante • • • Algoritmos Bitácora • • • Registro GPS Estándares Instrumentos para la Navegación Brújula, barquilla y corredera, sonda, escandallo, sextante, efemérides celestes, cronómetro marino GPS, Computadora, software, monitor

Figura: 4.2

Desde la propuesta de modelaje geoespacial de este trabajo, se identificaron sus principales componentes tales como las representaciones icónica, geomatemática y geocomputacional y se evidenció la correlación conceptual con los elementos tradicionales de navegación. La síntesis de este ejercicio se muestra en la Figura 4.2, donde se contrastan algunos de los elementos e instrumentos de la navegación de ayer y de hoy. Las listas no son exhaustivas pues sólo se pretende con ellas resaltar el gran contraste entre los instrumentos empleados por un lado y la riqueza actual de los recursos cartográficos; La representación icónica de antaño ha crecido y

hoy incluye representaciones alternas como la geomatemática y las tareas relativas a la cartografía también han cambiado o evolucionado hasta presentar nuevas facetas que las hacen irreconocibles, muchas actualizaciones que instantáneamente se reflejan en el mapa virtual pueden esperar mucho tiempo antes de aparecer en una nueva impresión.

La representación del paisaje geográfico en el cual ocurre la navegación terrestre, ha de realizarse mediante una abstracción matemática que modela aquellos elementos o características esenciales de los rasgos geográficos definitorios del espacio navegable. La navegación descrita antes exige establecer una relación biunívoca entre el posicionamiento y el modelo geoespacial.

#### Aspectos Prácticos

Recapitulando los tres capítulos precedentes tenemos que el navegante requiere determinar su posición en el terreno y en el mapa. Sin lugar a dudas, el instrumento ideal para conocer la posición en el terreno es un receptor GPS, mismo que proporciona las coordenadas geográficas del lugar dónde se realiza la recepción, y son estas coordenadas las intermediarias para ubicar en el mapa el punto asociado al punto en el terreno.

Con un receptor GPS se puede determinar la posición geográfica de manera dinámica, mediante la lectura del aparato cada "x" segundos, (y si se quiere ser riguroso al extremo, llenando los tiempos entre una posición y la siguiente navegando por estima). Esto es la concreción del sueño de muchos capitanes y marinos. Las limitaciones a esta manera de ubicarse se mencionaron antes, alrededor de quince metros de error horizontal en el posicionamiento por la naturaleza del sistema, más los errores producidos por los reflejos o la ausencia de señal en los cañones urbanos, los túneles bajo tierra o bajo la cubierta vegetal. (No se hace aquí ninguna consideración a eventos o circunstancias extremas tales como la producida por una tormenta solar que pudiera deshabilitar el sistema en el aspecto negativo, o el uso de equipos receptores capaces de hacer las correcciones diferenciales de manera dinámica en el positivo, sino que nos limitamos a los receptores de costo bajo y medio que recogen simultáneamente la señal de cuatro o más satélites).

En este trabajo se propone pero no se hace explícito cómo han de conjuntarse el receptor GPS y el modelo geoespacial que se adoptará para la navegación. Se tiene en mente que el instrumento de navegación al que nos referiremos en términos genéricos como navegador, es equivalente a un receptor GPS con capacidades de una computadora, memoria, procesador e interfases con el usuario, y que puede incluir una pantalla para el despliegue gráfico. Este instrumento impone necesariamente restricciones, por su particular naturaleza, (las unidades existentes en el mercado van desde unidades de bolsillo hasta equipos mayores instalados en un vehículo) mismas que obviaremos por las razones bien sabidas de la creciente capacidad y decreciente costo asociado a estos equipos en función del tiempo. En la mente del autor están las unidades de bajo costo como una PC con un GPS (Navman) conectado vía un cable USB y software Rand McNally (menos de \$100.00 US) hasta equipos de mayor costo como los NAVTEQ que van conectados al odómetro del vehículo y cuentan con un equipo complementario de navegación inercial para resolver los períodos sin señal del GPS en túneles o cañones

El otro elemento requerido por el navegante es el mapa. El hecho de que la posición sea determinada mediante un receptor GPS exige un mapa capaz de llenar o satisfacer las condiciones impuestas por la precisión del GPS. Se mencionó antes la cifra quince metros, pero también se hizo referencia a que pronto se contará con instrumentos con errores de centímetros. La cartografía para navegar con el auxilio de un GPS debe poseer una resolución tan buena o mejor que ésta. Sin menoscabo de los muchos otros recursos cartográficos disponibles, el instrumento más idóneo para hacer la cartografía para navegar con un GPS es la que puede elaborarse empleando lecturas GPS, por ejemplo, corregidas diferencialmente.

Otra gran exigencia para la cartografía para la navegación descrita es la impuesta por el espacio navegable. La navegación terrestre se realiza sobre autopistas, vías, caminos, avenidas y calles, que se recorren en vehículos y veredas, andadores o plazas que se recorren a pie. A diferencia de la marina, la navegación terrestre se hace en los espacios restringidos dedicados al tránsito vehícular o peatonal. Tanto el sistema Dime/Tiger como la infraestructura de datos geoespaciales descritos someramente en el Capítulo 2 presentan características que el autor estima necesarias o deseables para el modelo geoespacial para la navegación.

Una consideración de índole general en la concepción de navegación sobre la que se discurre es que en el ir de un lugar a otro, el navegante tiene en todo tiempo un razonable control y dominio de sí y de su vehículo. Empero, tal control o dominio no se ejerce sobre otros navegantes y

vehículos que hacen uso del mismo espacio, razón por la que, aunque se asume el ideal de la navegación automática o mecánica, se presupone también la necesidad, presente en todo momento de la navegación, de un piloto o un práctico, usualmente el navegante mismo, al mando del vehículo para tomar las medidas pertinentes y necesarias para responder a eventos o circunstancias no previstos o totalmente impredecibles como por ejemplo, el cambio de luces de un semáforo en una calle o la presencia de un semoviente a mitad del arroyo vehicular. Así pues, distinguimos de esta manera entre navegar y pilotar, correspondiendo lo primero a darle propósito al viaje o seleccionar la ruta, esto es, a lo previsible a mediano y largo plazos y lo segundo, a la aplicación del acelerador o los frenos o el hacer girar el timón para evadir un obstáculo imprevisto, o sea, lo que requiere atención instantánea para responder continuamente a las condiciones variables del entorno.

#### • Elementos de información geoespacial

Es posible que la consideración de mayor importancia en la concepción del modelo geoespacial sea el hecho de que, aunque se recurra reiteradamente a los recursos de la cartografía convencional, pues una y otra vez se hace referencia al mapa o a la cartografía, los elementos cartográficos del modelo no existirán más en el papel, (del cual pudo provenir) sino que son meras listas en la memoria de una computadora, listas que bien pueden nunca ser vistas en papel, sino manifestar su existencia únicamente como parte de los despliegues gráficos de un dispositivo electrónico. (Estas listas, y las relaciones que se establezcan entre ellas y entre sus elementos constituirán las bases para la integración de una base de datos con el auxilio de un manejador de bases de datos relacional como el de Oracle o un manejador de "objetos").

Por lo anterior, cuando más adelante se hable, por ejemplo, de un punto se deben tener presentes tres concepciones del mismo: 1) es un punto en el espacio geográfico, por ejemplo, la intersección de dos calles, o el lugar dónde se ubica un monumento, 2) es el punto que en un mapa o despliegue gráfico corresponde a tal intersección o monumento y 3) es un nombre irrepetible, un número de serie, un identificador único. (Por lo general, es además conveniente tener en mente esta tricotomía de manera simultánea y concurrente al analizar el modelo o sus aplicaciones). Otro tanto ocurre si nos referimos a otros elementos cartográficos ya sea una línea

o un área, que corresponden a objetos reales o virtuales en el espacio geográfico, a rasgos lineales o superficiales en la representación iconográfica de tal espacio y a un nombre irrepetible, un número de serie, un identificador único en el modelo.

A tal nombre irrepetible, número de serie o identificador único también se le llama "handle", voz inglesa para asa o asidero, pues cumple con una función de tal naturaleza, permite asir fácilmente todas las partes de un elemento cartográfico. El papel de este nombre o asa es central en el modelo, ya que las listas antes mencionadas se forman asociando al identificador único, todas aquellas características o valores necesarios o convenientes para las funciones que se demanden del modelo. Adelantando un poco lo que se trata en la sección siguiente, la primera versión del modelo es equivalente a una gráfica plana constituida de nodos, líneas y áreas, que equivalen, en la mayoría de los casos, a intersecciones, calles y manzanas. A cada nodo, línea y área de este modelo le corresponde un identificador único o numero de serie. Para formar las listas mencionadas arriba, por ejemplo, en el caso de los nodos, al asa de un nodo se le asocia en primer término el vector de posición del mismo, (latitud, longitud, altitud ó su equivalente). Posteriormente también se le asociará la lista de números de serie de los segmentos de línea que en tal nodo convergen. Al handle de un área se le asocian en primer lugar las coordenadas de su centro (o su centroide, que es un punto arbitrariamente escogido al interior del área) y también la lista de los handles correspondientes a los segmentos que rodean y definen el área. El caso de las líneas es muy interesante; se puede asociar su handle con un punto a su interior y como en los casos mencionados asociarle las coordenadas o vector de posición. También podemos asociar el handle de cada línea con los handles de sus puntos extremos. (En algunos casos problema, también se pueden emplear los *handles* de las dos áreas separadas por dicha línea).

El uso generalizado y sistemático de los *handles* en la integración de listas de características o valores asociados de cada clase de rasgo permitirá proporcionarle al modelo una flexibilidad que no tendría sin el uso de este recurso que en apariencia sólo incrementa los recursos necesarios, pero a guisa de ejemplo véase lo siguiente. Supóngase que la esquina donde se ubica la Torre Latinoamericana aparece en el modelo como la intersección  $I_j$  con coordenadas  $(\lambda_j, \phi_j, h_j)$ , donde confluyen los segmentos  $C_p$ ,  $C_q$ ,  $C_r$  y  $C_s$  correspondiendo los segmentos  $C_p$  a la Av. Juárez,  $C_q$  a la calle Francisco I. Madero,  $C_r$  a la Av. San Juan de Letrán y  $C_s$  a la calle de Juan Ruiz de Alarcón. Pero  $C_q$  también es conocida como Plateros y  $C_r$  y  $C_s$  también se conocen como Eje Central o como Lázaro Cárdenas.  $C_r$  es el segmento comprendido entre  $I_j$  e  $I_k$  donde  $I_k$ 

corresponde a la intersección de la Av. San Juan de Letrán y las calles de Independencia y 16 de Septiembre. Dicho sea de paso, el domicilio de la Torre Latinoamericana es Av. San Juan de Letrán  $N^{\circ}$  2 o sea  $(C_r N^{\circ} 2)$ .

#### • El modelo geoespacial para la navegación.

El universo en el que se hace la navegación terrestre no es la superficie de la tierra en toda su extensión sino que se limita a las vías destinadas a tal fin. La navegación se hace por calles y avenidas, por ríos y canales, por andadores, ciclopistas, caminos y carreteras.

El modelo que nos conviene emplear es una gráfica, cuyas líneas corresponden a los centros de calles u otros rasgos lineales; los vértices o nodos, son los puntos dónde tales líneas se intersecan y las áreas definidas entre dichas líneas. Estas líneas, nodos y áreas reflejan la estructura urbana básica de calles, cruceros y manzanas. La Topología, la Geometría y la Teoría de Gráficas, entre otras, proveen la estructura matemática que proporciona teoremas aplicables a los problemas de construcción e integración del modelo así como a su empleo para la navegación u otros usos.

Es muy importante añadir todos los otros rasgos lineales de relevancia tales como los límites administrativos o jurisdiccionales y las fronteras, la hidrografía, los derechos de vía de las redes de cables y ductos o las vías férreas. También, como en la estructura Dime/Tiger, las celdas 0 corresponden a los puntos iniciales, finales e intersecciones de los segmentos lineales; las celdas 1 corresponden a cada segmento lineal y las celdas 2, correspondientes a todas las áreas mínimas o básicas, formadas por la concatenación de celdas 1.

Para mejorar la representación geométrica o gráfica de las líneas curvas, es conveniente incluir algunos puntos auxiliares cuyo número total debe mantenerse en el mínimo posible. Estos puntos auxiliares no constituyen celdas 0 ya que son elementos de la traza de calles, importantes en el dibujo pero que no inciden en la topología del modelo.

Para la construcción de este modelo es conveniente concebirlo de manera gradual, en paralelo al desarrollo histórico de la ciudad, que en sus orígenes se componía primeramente de edificaciones entre las que fueron surgiendo, o se fueron formando calles, parques, plazas, muelles, puentes o

malecones hasta llegar a los últimos doscientos años en que se añadieron estructuras más complejas como trenes subterráneos, autopistas y vías confinadas, túneles y pasos a desnivel. Esto permite construir una primera versión del modelo en el que ya aparecen todas las manzanas y áreas equivalentes, a la que se pueden añadir aquellos elementos que no corresponden a una gráfica plana, tales como pasos a desnivel, túneles o segundos pisos. La razón para marcar este hito en la integración de este modelo estriba en que las verificaciones de integridad y consistencia entre las celdas 0, 1 y 2 mencionadas anteriormente como ediciones topológicas de un archivo Dime/Tiger sólo son posibles de realizarse en estas condiciones. En esta etapa el modelo ya contiene todas las manzanas por lo que es posible asociar las direcciones o domicilios postales disponibles a las celdas 1 del modelo, ya sea por medio del rango de la numeración o bien, listando los números existentes a uno y otro lado de cada cuadra.

Asúmase por lo pronto, que el modelo de gráfica plana ya está terminado, todas las manzanas, calles e intersecciones están incluidas y verificadas, cada cual con su *handle* asociado. Esto significa que se dispone de las listas de los *handles* de cada clase de segmento lineal, de los *handles* de las áreas elementales que los elementos lineales generan y de los *handles* correspondientes a las intersecciones. Las listas de las celdas 0 apuntan a la lista de coordenadas geográficas y a la lista de celdas 1 que la conforman.

Las listas de celdas 1 apuntan a las celdas 0 en sus extremos inicial y final, y (cuando es pertinente y posible) a la numeración a derecha e izquierda. Por otro lado, deben también estas listas de celdas 1 apuntar a todas las instancias pertinentes en la lista de nombres de calles existentes, siendo la primera instancia aquella correspondiente al nombre oficial (ya sea el empleado por el Servicio Postal para la entrega de correspondencia o por el gobierno local para fines catastrales o administrativos). Las listas de celdas 1 también deben apuntar a una lista de clases de celda 1, en particular para distinguir las relevantes al propósito de navegación del modelo y para poder heredar a las celdas 0 sus propiedades cuando es necesario o conveniente.

Las listas de celdas 2 apuntan a las coordenadas geográficas del centroide asociado y a las celdas 1 que las limitan. (El punto empleado como centroide no es una celda 0).

Considérese que con los elementos cartográficos hasta aquí descritos, un potencial navegante puede, en principio, determinar su posición y ubicar en el modelo su destino mediante el uso del domicilio, calle y número. Puede también determinar la ruta más corta entre ambos sitios,

digamos tendiendo una recta entre los dos extremos para buscar después a uno y otro lado de esta recta las celdas 1 que formen el área más pequeña que contenga a la recta para finalmente escoger la más corta entre todas las posibles rutas empleando únicamente las celdas 1 contenidas en la envolvente. Cuando decimos celdas 1 nos referimos únicamente a las que están en las clases que son transitables. Pero, el modelo es muy limitado, la solución obtenida puede acaso ser satisfactoria para un peatón pero nada más.

El modelo ya descrito puede incrementar sus capacidades si a las celdas 1 relevantes se les añade un indicador que haga referencia al sentido del tráfico vehicular en la tal vía, por ejemplo, el signo "+" si los vehículos se mueven de la celda 0 inicial a la celda 0 final, el signo "-" si se mueven en sentido inverso, "=" cuando la vía es de doble sentido y lo dejamos en blanco cuando no se dispone de la información.

Empleando la nomenclatura introducida antes para referirnos a las celdas 0 como  $I_j$  (Intersección j), a las celdas 1 como  $C_i$  (Calle i), a las celdas 2 como  $M_k$  (Manzana k) y a los puntos auxiliares como  $P_n$ , diríamos que el modelo está formado por:

- A) Todos los puntos definidos por las intersecciones I<sub>j</sub> de los elementos lineales en el espacio geográfico de interés.
  - 1)  $I_i = \text{es la "j"-\'e+cima celda 0 e } I_i \text{ es su identificador único o } handle.$
  - 2)  $I_i = (\lambda_i, \varphi_i, h_i)$ , dónde  $\lambda_j$  es la longitud,  $\varphi_j$  es la latitud y  $h_j$  es la altitud.
  - 3)  $I_j = \{C_1, C_2, C_3, ...C_n\} \text{ donde } C_1, C_2, C_3, ...C_n \text{ son todas las celdas 1 que convergen}$  en  $I_j$
  - 4) I<sub>j</sub> pertenece a una clase de celdas 0, producto de las posibles combinaciones de elementos lineales considerados en el modelo. (Calle - calle, calle - cuerpo de agua, calle - andador, calle - vía férrea, calle - derecho de paso ducto o cables, calle - límite administrativo y demás).
- B) Todos los elementos lineales en el espacio geográfico de interés, C<sub>i</sub>, entre dos intersecciones consecutivas. (En el caso de calles, cada cuadra o sea, cada lado de una manzana, en general, cada lado de un área elemental M<sub>k</sub>).

- 1)  $C_i = \text{es la "i" -écima celda 1 y } C_i \text{ es su identificador único o } handle.$
- $C_i = \{I_o, \, I_t\} \quad \text{d\'onde } I_o \, e \, I_t \, \text{son los nodos extremos, origen y t\'ermino, del elemento} \\ \quad \text{lineal } C_i, \, \text{que es la representaci\'on elemental de una celda 1, aunque} \\ \quad \text{frecuentemente se ver\'a como en el siguiente rengl\'on.}$
- C<sub>i</sub> = {+/-/=}, {I<sub>o</sub>, I<sub>t</sub>}, {p<sub>1</sub>, p<sub>2</sub>, p<sub>3</sub>...p<sub>n</sub>}, {M<sub>d</sub>, (mind, maxd), M<sub>i</sub> (mini, maxi)}, dónde el signo + indica que el sentido vehicular coincide con el origen término del segmento, el signo lo contrario, el igual que es de doble sentido; I<sub>o</sub>, es la intersección origen, I<sub>t</sub> es la intersección terminal, p<sub>1</sub>,p<sub>2</sub>,p<sub>3</sub>...p<sub>n</sub> son los puntos auxiliares para "dibujar" la curvatura del rasgo lineal en su caso, M<sub>d</sub>, es el *handle* del área a la derecha, mind y maxd son los números mínimo y máximo a la derecha, M<sub>i</sub> es el *handle* del área a la izquierda y mini y maxi, son los números a la izquierda.
- 4)  $C_i = \{\text{Nombre (oficial) de la calle o rasgo, alias 1, alias 2, ...alias n}\}$
- 5) C<sub>i</sub> pertenece a una clase de celdas 1, calle (o una de sus muchas alternativas), cuerpo de agua, ribera, vía férrea, andador, ciclovía, derecho de paso de ductos o líneas eléctricas, y demás.
- C) Todas las áreas elementales  $M_k$  en que queda subdividido el espacio geográfico por las celdas 1,  $(C_i)$ , usualmente manzanas o predios, aunque también se presentan fracciones de manzana o predio. Debe también incluir el espacio continente  $M_{\Omega}$ , el exterior a la suma de todas las celdas  $M_k$ .
  - 1)  $M_k = \text{es la "k"-écima celda 2 y } M_k \text{ es su identificador único o } handle.$
  - 2)  $M_k = M(\lambda_k, \varphi_k, h_k)$ , es el "centroide" de  $M_k$  (el centro u otro punto arbitrario al interior de  $M_k$  con el que se identifica el área o sus características, valores o propiedades.)
  - 3)  $M_k = \{C_1, C_2, C_3, ...C_n\}$  el conjunto de celdas 1 que limitan el área elemental  $M_k$
  - 4)  $M_k = \{\text{Nombre (oficial) del área, alias 1, alias 2, ...alias n}\}$

5) M<sub>k</sub> pertenece a una clase de celdas 2 como manzana, fracción de manzana, parque público, predio, plaza, aeropuerto, lago, presa, cementerio, área de conservación, patio de ferrocarril, campo deportivo, centro comercial, estacionamiento, y otros.

Otro elemento que se considera de gran valía para la explotación del modelo es la generación de las llamadas claves de Peano mencionadas en el Capítulo 2. La clave de Peano es un número unidimensional que representa una pareja de números. Si todos las celdas 0 de un espacio se listan de acuerdo a su clave de Peano, basta comparar la clave de Peano de un punto arbitrario con la lista para encontrar la celda 0 más cercana al punto. La clave de Peano asociada al *handle* de las celdas 0 y 2 constituyen los directorios o listas base a partir de las cuales se hacen las asociaciones necesarias para las búsquedas de elementos cartográficos del modelo.

Para poder hacer uso del modelo para funciones más complejas se debe hacer crecer el mismo y en primer lugar puede ser conveniente, pese a la redundancia que ello acarrea, conjuntar elementos fundamentales del modelo para constituir nuevos elementos con valor propio. Por ejemplo, puede ser conveniente sumar áreas básicas para disponer de particiones con un valor propio. Haciendo uso de tales sumas, el espacio total puede ser dividido en áreas con un mismo código postal, o bien en distritos, colonias, delegaciones, municipios o estados, por mencionar algunos. Algo semejante puede realizarse con celdas 1, por ejemplo, para integrar todos los elementos constitutivos de una calle, de principio a fin, en un único elemento.

Pero otra manera de obtener los mismos resultados, empleando la misma estructura de listas asociadas a los *handles* de cada celda, se logra añadiendo listas, siempre asociadas mediante los *handles*, con elementos o características de las celdas que genéricamente llamaremos "impedancias", (herencia de la nomenclatura asociada a redes eléctricas o circuitos electrónicos). Asociadas a las celdas 2 tenemos como impedancias la pertenencia a los valores mencionados arriba, la pertenencia de la celda 2 a un determinado código postal, distrito escolare, sección y distrito electorales, colonia, delegación o municipio, estado y otros que las necesidades particulares demanden.

Por ser fundamental para la navegación, debe asignarse a cada celda 1, las impedancias de las empleadas para tal fin, mismas que deben corresponder a las características propias para tal propósito. Por ejemplo, en una carretera, las impedancias son, entre otras, el número de carriles, el ancho de los mismos, las prohibiciones a la circulación para algunos vehículos, los límites de

velocidad establecidos, la pendiente máxima, el tipo de superficie de rodamiento, los límites geométricos impuestos a los vehículos. Además debe asignarse a cada celda 1 su pertenencia a una o varias clases, por ejemplo, la clase calles o la clase canales o línea eléctrica o telegráfica.

Por otro lado, debemos incluir aquellos elementos que no se incluyeron por la restricción impuesta por la gráfica plana. El modelo seguirá siendo una gráfica, pero ya no cumplirá con las limitaciones ni propiedades de las gráficas planas empleadas para su construcción inicial; las cuales cumplieron funciones de ahorro en tiempo de construcción y flexibilidades en el control de calidad. Al ampliar el modelo debe recordarse que existen también direcciones asociadas a estos rasgos omitidos, como ejemplo, recuérdese la existencia de pequeños locales comerciales en estaciones del Metro o en pasos peatonales (como aquellos bajo la Calzada de Tlalpan o Paseo de la Reforma entre Lieja y Ródano). Tales domicilios deben ser incluidos en algún momento.

#### • La gráfica no plana.

Al añadir a la gráfica plana los elementos correspondientes a puentes, pasos peatonales, vías elevadas y demás elementos excluidos en la versión previa por no ser definitorios de áreas elementales, emerge la gráfica no plana. Para añadir estos rasgos lineales, como celdas 1, han de añadirse sus nodos de principio y fin como celdas 0, en sus intersecciones con las celdas 1 ya existentes en el modelo de gráfica plana. La inclusión de estos nuevos rasgos no debe generar área alguna, ya que esta es la condición de pertenencia a la gráfica plana del modelo básico.

A los rasgos añadidos debe darse el mismo tratamiento que a los ya existentes en lo relativo a lo que se menciona en los puntos A y B de la sección precedente, esto es, asignarles un *handle*, coordenadas, nombre, clase y demás, así como las impedancias correspondientes. Se tiene ahora una gráfica que contiene todos los centros de calle, caminos, andadores, vías férreas, líneas de transmisión eléctrica, ductos, ríos y riberas, límites y fronteras. Pero para navegar con el auxilio de vehículos motorizados es necesario añadir elementos específicos. Las estaciones de Metro y trenes, las rutas y paradas del transporte público local y foráneo, así como sus horarios de servicio pueden describirse sobre el modelo en esta etapa.

Para la navegación en vehículos propios el modelo deberá crecer notoriamente. Debemos sustituir la gráfica con una gráfica dirigida, para lo que basta con tomar cada celda 1 y verificar que la circulación de los vehículos sea en dirección de la celda 0 de origen a la celda 0 terminal, de no ser así, basta invertir el orden de las celdas 0 para obtener la celda 1 deseada en la gráfica dirigida (Harary,1969: 198). Cuando la circulación sea en ambos sentidos, es necesario tener dos celdas (1), una para cada dirección. Las gráficas dirigidas, incluyendo las impedancias que se les asocian resuelven de manera interesante el problema de los autobuses a contraflujo y nos plantea otra solución interesante, al que presentan los camellones o jardineras que dividen ambas calzadas en muchas de nuestras calles y avenidas. Las limitaciones reglamentarias o señaladas mediante señales restrictivas, informativas y preventivas al flujo vehicular pueden añadirse al modelo de gráfica dirigida como impedancias. En particular, para la navegación tienen gran importancia las impedancias que limitan el progreso del vehículo en alguna dirección, como son las vueltas prohibidas y los semáforos en operación. Es posible también incorporar como impedancias la información relativa a la velocidad promedio en distintos horarios y en días laborales y festivos.

Un problema pendiente, pero que también admite solución en el marco de la gráfica dirigida es el que presentan las vías con accesos restringidos, aquellas con carriles centrales y laterales y aquellas que alimentan túneles o puentes además de otras salidas a nivel. También los tréboles viales pueden demandar una solución particular. En esencia, basta añadir celdas 0 y 1 para representar la conectividad exigida por la operación real de las vías.

El modelo de gráfica dirigida, ampliado para soportar la información relativa a carriles contiene toda la información necesaria para realizar la navegación, asumiendo un par de domicilios conocidos e identificados unívocamente. O sea, dada una celda 0 de origen y otra de destino, sobre este modelo es posible automatizar la selección de una ruta óptima bajo algún criterio para el cual se incorporen las impedancias pertinentes. Sin embargo, para ser de uso generalizado, sigue siendo imperativo ampliar el modelo. La navegación urbana se hace empleando muchos recursos entre los cuales dificilmente figuran las coordenadas geográficas. Mandar una carta por correo o pedirle al taxista que nos lleve a tantos y cuantos grados de latitud y longitud no ocurre sino al interior de un modelo geoespacial que reconoce una dirección, - calle y número,- y la traduce a coordenadas para ubicarla. Pero además de las direcciones postales también se emplean otros recursos para ubicar orígenes y destinos.

Seguramente un taxista reconoce con mayor facilidad la solicitud de un pasajero para ir a la Torre Latinoamericana que al número dos de la Avenida San Juan de Letrán. Es posible que la Torre Latinoamericana de la ciudad de México siga siendo un hito mejor conocido que los edificios que compiten con ella en altura. Así pues, es necesario incorporar al sistema una larga lista de puntos de interés (PDI) cual si fueran celdas 0, aunque no lo son, con *handles* asociados a sus coordenadas geográficas con el propósito de que jueguen en el modelo el mismo papel fundamental que juegan en la realidad, como faros que facilitan la navegación.

Entre los PDI se deben incluir todos los rasgos geográficos, puntos notables del paisaje, hitos que por su notoriedad contribuyan a facilitar a las personas su ubicación. Los monumentos, fuentes, edificios públicos, sitios de reunión, templos, centros comerciales, mercados, hospitales y clínicas, museos, bibliotecas, sitios arqueológicos, fuentes, teatros, escuelas, universidades, centros de investigación, zoológicos, parques, jardines y muchos otros, que presentan un atractivo para gran parte de la población y por tanto deben incluirse entre los puntos de interés general. Pero, con la excepción de la mayoría de las viviendas, casi todas las estructuras que se levantan a la orilla de calles, caminos y riberas corresponden a actividades humanas de gran importancia para algunas personas usuarias de un instrumento de navegación. Algunos instrumentos de navegación comerciales señalan, a petición del usuario, la ubicación de expendios de combustible, hoteles, bancos y restaurantes más cercanos a la ubicación del usuario, pero es indudable que hay un gran número de vendedores y distribuidores de toda clase de bienes y servicios, usuarios potenciales del modelo, para quienes es fundamental ubicar los pequeños comercios o los salones de belleza o las tintorerías o los consultorios dentales.

La razón para incluir los puntos de interés y rasgos geográficos mencionados en los párrafos anteriores obedece aquí al hecho de que la navegación es afectada por razones psicológicas, culturales o educativas de muy diversa índole y que inciden o pueden incidir de manera determinante en cómo se hace la navegación por un usuario. Por ejemplo, mientras que muchas personas navegan siguiendo rumbos, hay muchas otras que prefieren navegar por hitos o puntos notables. En el modelo planteado es posible asignar a muchos puntos de interés una ilustración o fotografía representativa del mismo que puede servir para identificación y ubicación.

Los familiares domicilios postales que incluyen calle y número, colonia, código postal y municipio, son en la práctica cotidiana poco comunes. Debido al escaso uso que se da al servicio postal o al hecho de que a menudo, las personas asignan límites borrosos a las colonias, pese a

que están bien definidas en la cartografía administrativa o gubernamental. Por ejemplo, en la ciudad de México la colonia del Valle se extiende, en la percepción del autor, de Viaducto Miguel Alemán a Río Churubusco de Norte a Sur y de Cuauhtémoc y Universidad hasta Insurgentes, de Oriente a Poniente. No obstante, en esa poligonal hay otras colonias como Acacias, Actipan, Presidente M. Alemán, Tlacoquemecatl, Narvarte y Piedad Narvarte. Esto nos hace pensar que si el problema se plantea con límites borrosos, la solución debe asimismo tomar tal carácter. Ya sea porque al buscar un rasgo al interior de una colonia ésta deba ser considerada junto con sus vecinas inmediatas como una misma colonia o asignarle a cada colonia un punto interior como centroide para hacer la búsqueda a partir de él mediante una función decreciente con la distancia a tal punto.

Hay una colección de problemas relativos al modelo geoespacial para la navegación sobre los que no se profundizará. Por ejemplo, se hizo mención a la multiplicidad de nombres para una misma calle y se propuso que todos y cada uno de los nombres listados apuntaran al *handle* o *handles* asociados; pero cuando se comete un error de ortografía, o no se registró el valor citado no se cuenta con ningún recurso. Empero, no es difícil incorporar un algoritmo que al no encontrar el valor buscado en las listas, haga un recuento de aquellos que se aproximan y los proporcione como posibles alternativas de manera similar al corrector de ortografía de los procesadores de texto. En otro aspecto del mismo tema, los nombres de las vías pertenecen a clases que se separaron del nombre mismo, calle, avenida, paseo, callejón y muchos otros no deben servir como llaves primarias de búsqueda, sino sólo de manera secundaria para discriminar entre opciones.

#### • Precisión, error, actualizaciones, metadatos, semiología.

La integración de un modelo geoespacial para la navegación terrestre debe contemplar aspectos tradicionales de la cartografía. Por ejemplo, si bien es cierto que la escala es irrelevante en los aspectos del modelo que se han presentado, la precisión si juega un papel fundamental. Es en las celdas 0 (y en menor medida en los puntos auxiliares) donde la precisión y el error asociados a las coordenadas tienen un significado equivalente al de la escala en la cartografía icónica. El modelo propuesto tiene la ventaja de que se pueden modificar estos valores (asociados

esencialmente mediante su *handle* a todos los demás elementos del modelo) para un solo punto, para algunos de ellos o para todos. Supóngase que el modelo se pone en operación con una resolución de 1 metro y un error de 10 metros y que tiempo después, se hace un nuevo levantamiento de una región para el que se tiene una resolución de 1 decímetro y un error de 1 metro. Se modifican todas las celdas 0 de la región y simplemente se registran, como impedancias, las nuevas características de cada punto afectado.

Este es un asunto de gran relevancia ya que el registro de las características del modelo, propias de sus orígenes, fuentes, mecanismos y fechas de creación, que en la cartografía convencional se asocian a cada mapa o cada serie y se registra textualmente en la leyenda o en la tira marginal para la totalidad del mapa o alguna clase de rasgo del mismo, en el modelo que se propone estos valores o metadatos pueden asociarse a rasgos individuales. La historia de la creación del modelo y la evolución del paisaje definido por el mismo pueden fácilmente ser parte del modelo si al hacer correcciones y actualizaciones se conservan los elementos sustituidos con la etiqueta temporal correspondiente a su fecha de 'baja del activo'.

La semiología gráfica en el entorno dinámico de los despliegues gráficos típicos de las computadoras portátiles y de mano, con monitores de dos a quince pulgadas (5 a 45 cm medidos diagonalmente) presenta retos y oportunidades muy distintas a las de la cartografía en papel. Así como en las cartas de marear se señalan las corrientes y sondeos, los faros y canales, en el modelo descrito también se "dibujan" las vías, sus dimensiones y señales, los hitos o puntos notables. El tamaño pequeño de los despliegues gráficos y las condiciones dinámicas de la navegación hacen que la velocidad del vehículo y la densidad de la información del lugar puedan incidir de modo definitorio en las soluciones semiológicas. Una convención adoptada, al menos como opción, es que en la parte superior del despliegue gráfico no aparece necesariamente el Norte, sino la dirección en la que se da el desplazamiento.

## • Fuentes de datos para el modelo

.

Usualmente, un nuevo producto cartográfico se apoya en productos similares preexistentes. El tiempo y los recursos económicos asociados a la producción cartográfica por cualquier medio

son altos por lo que en general es deseable utilizar productos ya existentes para reducir la duplicidad de esfuerzos. La adquisición de datos directamente del terreno y la verificación en campo llevan los mayores costos asociados.

Registrar los recorridos hechos empleando equipos GPS diferenciales es sin duda el mejor mecanismo para la obtención de datos para integrar el modelo geoespacial, aunque sin lugar a dudas, será necesario recurrir a mecanismos derivados del uso de los productos preexistentes como por ejemplo, directorios y mapas en papel. La función que juega en el proceso de construcción del modelo la gráfica plana es muy importante ya que permite integrar información de fuentes diversas con niveles aceptables de error y proporciona mecanismos para su depuración. Construir el modelo de la gráfica plana completo, implica levantar casi dos veces la misma información, pero hace robusto al sistema que adquiere así capacidad para soportar procesos tan complejos como los documentados por el Bureau de Censos en los EEUU en las referencias citadas en el Capítulo 2, la redistritación electoral federal de 1996 en México, (IFE, 1997: 62-72), (RFE, 1996) o los que demanda un navegador, lo cual justifica el alto costo que conlleva.

Las empresas que comercializan navegadores para automóviles usan los mismos instrumentos de navegación para elaborar los modelos geoespaciales. A bordo de vehículos equipados con receptores GPS y computadoras recorren campos y ciudades, calle a calle, caminos y carreteras, anotando y registrando la información. El trabajo de gabinete posterior para integrar la información obtenida en campo con la proveniente de otras fuentes, imágenes de satélite, fotografías aéreas, mapas existentes y documentación varia de diversas fuentes y la verificación en campo posterior a la terminación del producto son similares a los que se encuentran en la cartografía convencional.

Una opción que en las condiciones imperantes en nuestro país se debe considerar es la de convertir documentos en papel. Para algunas áreas de difícil acceso pudiera ser la manera recomendable de integración al modelo.

# • Algoritmos para la navegación.

Una gráfica dirigida en la cual se incluye como impedancia el costo asociado a cada segmento y un grupo de nodos a visitar haciendo un circuito de costo mínimo, constituye el famoso problema del vendedor viajero para el que no hay una solución algorítmica óptima.

Así, siempre se podrá encontrar el camino entre dos puntos, aunque no siempre será el mejor camino, entendido como aquél en que los costos asociados corresponden a algún criterio de optimización. Por ejemplo, para la distancia tendremos la ruta más corta, para el tiempo la más rápida, aunque se puede seleccionar la ruta con más puntos de interés, o una que evite semáforos o vías rápidas. Se puede considerar también que para un taxímetro funcionando en base a una cuota fija (banderazo) más un tanto por unidad de tiempo detenido en semáforos, más otro tanto por la distancia total recorrida, la mejor solución para el pasajero es la que minimiza el tiempo, ya que usualmente gana más por hora que el taxista. Para éste, la mejor solución es incrementar la distancia en el tiempo mínimo y maximizar el número total de viajes en una jornada. Cualesquiera que sean los parámetros usados para optimizar, minimizar o maximizar, estos deben encontrarse entre las impedancias incluidas en el modelo o ser función de tales impedancias.

En relación con los algoritmos para encontrar la ruta más corta entre dos puntos, B. Zhan y C. E. Noon, (1998) reportan la evaluación de quince algoritmos con redes de caminos reales. De tal experiencia, mencionan que el algoritmo de Floyd-Warshall es de uso común y añaden: "este algoritmo se usa normalmente para calcular las distancias más cortas de todos y cada uno de los nodos a todos los demás. Requiere una matriz de distancias durante su ejecución y tiene una complejidad de  $(N^3)$ ". Los autores recomiendan el de Pallotino de gráfica creciente con dos colas (TWO-Q) y el algoritmo de Dijkstra con baldes aproximados (DIKBA). Para el primero, la complejidad es:  $(N^2 \times A)$ , donde N es el número de nodos y A el número de arcos.

El mismo Zhan (1997) dice que el algoritmo DIKBA se recomienda para redes con menos de 1,500 arcos y para las que tengan un número mayor, sugiere emplear otro algoritmo. En la introducción a éste artículo, Zhan plantea la imposibilidad de prever el tiempo que la atención a una llamada de auxilio al 911 solicitando una ambulancia: "Debido a que un segmento en una red de caminos real en una ciudad tiende a poseer diferentes niveles de congestión a diferentes

horas del día, y como la localización de un paciente no puede ser conocida con anticipación, es prácticamente imposible determinar la ruta más rápida antes de recibir la llamada. Por tanto, sólo puede determinarse en tiempo real...". (Zhan, 1997: 2)

Ya sea que se desee emplear uno de los algoritmos existentes o se diseñe uno nuevo para encontrar la "ruta más corta" o "el circuito de menor costo" el modelo geoespacial descrito puede ajustarse a las exigencias que el problema demande ya que posee la riqueza y flexibilidad que demandan las aplicaciones.

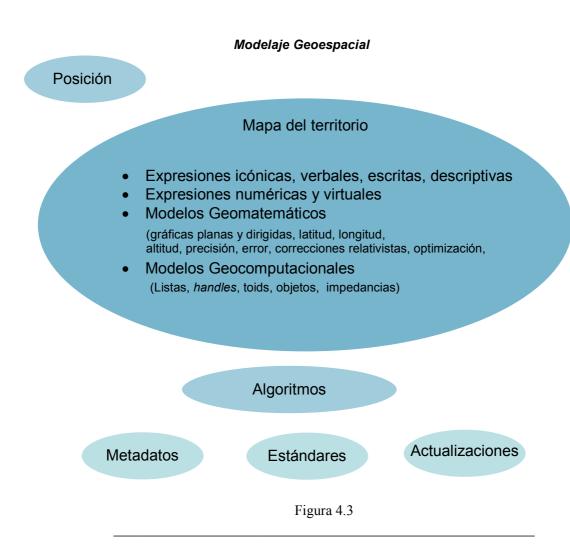
#### • Construcción, mantenimiento y actualización.

El mantenimiento y actualización de un modelo de la envergadura que la descripción hecha sugiere, requiere de una entidad responsable, capaz de producir el material para integrar el modelo original y de generar y distribuir las adiciones y modificaciones, manteniendo un registro histórico de los cambios y adiciones. Las autoridades municipales o equivalentes tienen responsabilidades en la creación de urbanizaciones mediante la ampliación de las redes de calles y servicios municipales pero el surgimiento espontáneo de colonias no planeadas hace necesario acudir a otras fuentes. La estructura del modelo facilita estas tareas.

\_\_\_\_\_\_

En síntesis, en este capítulo se ha elaborado acerca de los principales componentes que desde nuestra perspectiva deben incluirse en el modelo geoespacial para la navegación terrestre. De esta manera, se han abordado temas tales como el de gráficas planas dirigidas, gráficas noplanas, las dependencias del modelo en la precisión y el manejo diferencial del error métrico, la necesidad de las correcciones relativistas poco abordadas en la literatura y la presencia de problemas de optimización, entre otros. De igual manera, para la construcción del modelo, se revisan y proponen conceptos computacionales tales como las listas, los *handles*, el enfoque orientado a objetos y el uso de las impedancias. para la asociación de las características propias

de cada rasgo en cada instancia. Otros aspectos relevantes tales como el de algoritmos, metadatos simplemente se han mencionado (ver figura 4).



#### Conclusiones.

#### El Modelo

Recuérdese que es verdad aceptada la imposibilidad de realizar el mapa universal, cada mapa refleja un punto de vista, una visión del mundo individual, o particular de una profesión o producto de una visión colectiva pero jamás universal. Sin embargo, a lo largo fundamentalmente del siglo pasado, la carta topográfica sirvió como fundamento inmediato o remoto de una gran proporción de las representaciones del espacio geográfico a tal extremo que hasta las caricaturas cartográficas podían serlo por esta razón.

El modelo que se presenta en el capítulo precedente es un modelo amplio, capaz de cobijar la navegación de peatones, automovilistas, visitantes y turistas, pero también puede ser usado por transportistas, planeadores urbanos y servicios de emergencias médicas, bomberos y policías..

En la concepción de esta propuesta se tomó del Dime la idea central de la gráfica plana que proporciona el apoyo de la teoría de gráficas y permite resolver los problemas topológicos de contención y vecindad. La teoría de gráficas proporciona herramientas para 'editar', los mapas, esto es, asegurar su consistencia interna, mientras la topología de contención y vecindad permite realizar procesos como el de la redistritación electoral federal de 1996 en México, para el que se hizo una asociación entre las secciones electorales (que fungieron como áreas mínimas) y la población censal.

Del sistema Tiger se adoptó la idea de extraer la esencia de las gráficas separándola de la geometría al excluir los puntos auxiliares del dibujo y al ampliar la gráfica plana a una dirigida, mediante el uso restringido de las celdas 0, 1 y 2. La inclusión de la clave de Peano, que tiene también su origen en el Dime/Tiger, obedece al hecho de que permite construir una estructura de datos eficiente para encontrar, borrar, insertar y revisar la información bidimensional mediante el uso de un árbol B. (Semaphore Corp., 1987). La idea de asociar un *handle* con cada celda 0 y 2 refleja un inventario mínimo. Los toids que el Ordnance Survey emplea con propósitos más

extensos cumple también, de manera fundamental, con la integración de inventarios de rasgos geográficos.

## Aplicaciones

Es la visión del OS la que nos hace reconsiderar las aplicaciones de un modelo geoespacial como el propuesto. Esto es, además de constituir un instrumento para la navegación, ¿para que otros usos puede servir el modelo planteado?, ¿qué adecuaciones requiere? Por ejemplo, para manejar información en tiempo real sobre tráfico o estacionamientos disponibles, para el manejo de llamadas de emergencia, para la estadística y el análisis de accidentes, para la racionalización de los viajes y el transporte, para localización de vehículos, para la administración de flotas, para gestión del transporte de productos peligrosos, para registro y gestión de infraestructura y servicios municipales como agua potables, alumbrado, drenajes y muchos otros.

La primera razón por la que el modelo puede satisfacer múltiples demandas yace en el hecho de que en su parte medular: "Si puedo encontrar una casa usando calle y número, entonces esta etiqueta debe contener la misma información que la descrita por latitud/longitud... Consideradas más exactamente, las coordenadas son una manera de llamar los lugares que, entre otras cosas, permite que todos los lugares reciban un nombre único, que permite deducir de tales nombres relaciones entre los lugares".(Tobler, 1976: 25).

El modelo permite establecer muchas relaciones uno a uno entre la información proporcionada por el GPS, los *handles* de las celdas 0 y 2 con las celdas 1 y sus impedancias. Los *handles* también permiten establecer relaciones con los elementos de la información y las demandas, solicitudes o *queries* hechas al modelo, todas ellas expresados en un lenguaje casi vernáculo, que la computadora reconoce.

En el lenguaje de Tobler, en esencia el modelo traduce entre tres o cuatro lenguajes, el matemático de la latitud/longitud/altitud, la lengua vernácula de los nombres de las calles y colonias, el empleado por la computadora en sus entrañas y el lenguaje gráfico usado en los despliegues.

La otra razón de peso para la versatilidad del modelo se sustenta en que las visiones particulares de cada usuario se reflejan directamente mediante el uso de las impedancias. Esto significa que aún cuando el modelo de red de calles sea el mismo para un taxi que para el cuerpo de bomberos, las impedancias del primero no excluyen las calles que a los segundos les son vedadas por razones geométricas. Por ejemplo, un camión de bomberos muy grande, con escalas para llegar a un octavo piso, no da vuelta en cualquier esquina por lo que el mapa para ese camión sólo permite dar vueltas donde es posible hacerlo. De manera parecida, el modelo adecuado para un ciclista no considera la posibilidad de hacer uso de las vías de alta velocidad confinadas (como el Viaducto Piedad en la Ciudad de México).

El cambio paradigmático en la Cartografía trasciende el ámbito de la navegación y se extiende sobre otras disciplinas afines como la topografía y la planimetría y por consiguiente, sobre aspectos que eran casi marginales para el cartógrafo.

Por ejemplo, el bajo costo de los receptores GPS y lo fácil que es usarlos, hacen que tareas muy costosas en el pasado, como ubicar con un error inferior a un metro, una válvula en un ducto o la posición del ducto bajo el pavimento, puedan hacerse hoy a costos bajos cuando este conocimiento evita romper toda la calle para reparar una falla o permite evitar colisiones entre distintos usuarios del subsuelo. El modelo de Infraestructura de Datos Espaciales de Gran Bretaña, (Lawrence y Akcroyd, 2005) que consiste cuatro capas interoperables e internamente consistentes, 1) Topografía, 2) Domicilios postales, 3) Imágenes con resolución de 25 cm y 4) La red de transporte integrada, incluyendo información sobre restricciones a rutas. La infraestructura, que es actualizada y administrada por el Ordnance Survey, tiene 440 millones de objetos referidos mediante TOIDS, (TOpographic IDentifierS) similares a los *handles* aquí propuestos, que constituyen el denominador común para terceros pretende constituir la parte medular de nuevas aplicaciones. Así, si una empresa necesita hacer un hoyo para reparar un tubo o un cable, emplea el toid y los oficios del OS para que las otras empresas que tienen cables y tubos enterrados en el mismo lugar tomen las medidas pertinentes y asuman las responsabilidades propias para racionalizar la reparación.

Otra aplicación sería emplear los domicilios postales, (los derivados del modelo) en nuestro país, para la integración de un catastro estatal o nacional en el que aparezcan todas las propiedades, independientemente de la acuciosidad de las medidas o calidad de la construcción, sino simplemente con la inclusión de todos los predios y por tanto, todos los causantes, contribuiría

con un elemento más para la recaudación fiscal. El modelo presentado puede responder a éste propósito y sentar las bases para una nueva estructura topográfica para los impuestos prediales.

# • Contingencia-necesidad

Michael Shermer, (2006: 130) en el capítulo titulado "Exorcizando a los demonios de Laplace" dice que, como el proceso de modelar la historia en el lenguaje del caos y la dinámica no lineal constituyen un estudio ricamente interdisciplinario, lejos del campo de la tradicional historiografía, propone para el estudio de la historia el modelo contingencia - necesidad, dónde contingencia se entiende como la conjunción de eventos que ocurren sin un diseño perceptible y necesidad, como las circunstancias constrictivas que compelen un cierto curso de acción. Más adelante dice que en el desarrollo de cualquier secuencia histórica, el papel de las contingencias en la construcción de necesidades se acentúa en las etapas tempranas y se atenúa en las postreras.

Para aplicar este modelo de la historia a nuestro problema retomemos el artículo de Tobler que hace ya treinta años dice:

"Considere el problema de encontrar el expendio de gasolina más cercano cuando el indicador del automóvil indica *casi vacio*. Con todo el sistema de calles almacenado en el núcleo de una calculadora de bolsillo, y también la ubicación de todas las estaciones de gasolina que aceptan mi tarjeta de crédito, y con un algoritmo de ruta más corta eficiente para redes de este tamaño, parece ser un cómputo trivial."

Y en el párrafo siguiente: "... las muchas innovaciones que pueden esperarse en el futuro, indicadores de pulso de latitud y longitud y mapas desplegados mediante diodos emisores de luz..." Tobler es profeta o esas fuerzas de la historia están operando. Tobler observa o siente las contingencias que ocurren a su alrededor y vislumbra las necesidades que se darían. El indicador de latitud y longitud de pulso, (¿inspirado acaso en Dick Tracy?) se llama receptor GPS y su calculadora de bolsillo es una computadora, PC o palm o un equipo Navteq, Magellan o cualquiera de las muchas marcas y modelos en el mercado.

Las nuevas contingencias, acumulables a las ya vistas por Tobler son, en opinión del autor, representadas por Google Earth y Wikipedia, el surgimiento del software libre y de publicaciones con "copyleft", libres de derechos de autor, la continua disminución de los precios del hardware y

sus constantes incrementos en velocidad y capacidad que proporcionan potenciales insospechadas a una población creciente, hambrienta de soluciones reales a problemas que estiman propios, en términos personales como son las apremiantes exigencias para racionalizar el uso de los recursos, que se reflejan para nuestro caso, en los llamados Sistemas y Servicios Inteligentes de Transporte, en los crecientes flujos monetarios sustentados en los llamados Servicios Basados en la Localización, el transporte multimodal, la demanda de servicios con una componente geográfica como el 911 en Norteamérica y su equivalente en la Unión Europea, la gestión de incidentes, calamidades y desastres sobre las vías públicas y muchos otros

INEGI o el CentroGeo pueden asumir el rol de promotores y hasta el de gestores o depositarios de los sistemas geoespaciales para navegación y otros propósitos, pero si entidades públicas como las citadas no asumen esos papeles, habrá muchos que lo hagan entre las nuevas generaciones de emprendedores, ya en la academia o para vender el valor agregado, o como ocurre ahora con muchas cosas en la internet, simplemente porque se puede hacer, porque está ahí y es una provocación. Volviendo al modelo de la historia, en México estamos en una etapa temprana de esta historia, rica por tanto en contingencias, y con presiones fuertes, necesidades poderosas que serán cubiertas en el corto o acaso mediano plazo, por actores locales o extranjeros, y el modelo propuesto u otro similar verán pronto la luz.

En México también requerimos una infraestructura nacional de datos geoespaciales para satisfacer esa fracción desconocida del Producto Interno Bruto afectado por la carencia de ella. El modelo propuesto puede constituir una piedra angular de la infraestructura nacional de datos geoespaciales.

# • ¿Qué sigue?

Navegar es algo cuyo significado debe restringirse mucho cuando ha de hacerlo un ciego (Véase por ejemplo, Loomis et al, o consúltese la bibliografía que proporcionan). Mientras se buscaba y discurría como emplear la computadora para navegar, cuando se redujeron a su mínima expresión los elementos requeridos para navegar en un entorno de calles y caminos, se llegó a la conclusión de que con los elementos del modelo geoespacial propuesto es posible confiar el

trabajo de navegar a la computadora y a los sistemas de comunicaciones celulares y de FM de baja potencia como los empleados en otros países para informar de las condiciones del flujo vehicular en tiempo real. En un futuro cercano, muchos ciegos y débiles visuales, navegarán con computadora y GPS, pilotearán sus pasos con el bastón blanco o el perro lazarillo. La computadora hará la navegación con un modelo geoespacial como el descrito aquí.

Bertrand Russell, (1952: 23) dice: "La ciencia, desde tiempos de los árabes, ha tenido dos funciones: 1) nos permite saber cosas y 2) nos permite hacer cosas". Esta cita viene a la mente al volver la vista atrás y ver la senda que se ha andado para poder escribir este trabajo y al retomar algunas lecturas, que nos recuerdan el largo camino recorrido tras un quimérico modelo para la navegación terrestre sintetizado por Tobler (1976). Tal periplo lo realizamos bajo las luces de Russell, tratando de saber, entender, comprender y apropiar, pero también pretendiendo hacer, construir o integrar un modelo que sirva, cumpliendo ambas facetas de la ciencia, de la Geomática.

Nos consuela el poeta castellano, Antonio Machado, quien dice que "la página escrita no refleja lo mucho que se ha intentado, sino lo poco que se ha logrado" tras lo poco nuestro en estas páginas, pero dejamos a Tobler (1976:29) la última palabra: "En un ambiente universitario uno no debe emplear mucho tiempo para describir como se hacen hoy las cosas."

# Bibliografía

- Ashby, N., 1997, *General relativity in the global positioning system*. http://www.phys.lsu.edu/mog/mog9/node9.html, 3 p.
- Ashby, N., 2003, *Relativity in the Global Positioning System*. http://www.livingreviews.org/Articles/Volume6/2003-1ashby, 43 p.
- Brown, Lloyd A., 1949, The Story of Maps, New York, Dover Publications. 398 p.
- Cameron, A., 2006, *The Olympics of GNSS*. en GPS World, Feb. 1, 2006, http://www.gpsworld.com/gpsworld/article/articleDetail.jsp?id=291919, 3 p.
- DoD (Department of Defense), 2001, *Global Positioning System. Standard Positioning Service. Performance Standard.* Washington, DC, Assistant Secretary of Defense. 65 p.
- ESA, (European Space Agency) 2005, esa Navigation. http://www.esa.int/esaNA/
- Gallison, P. L., 2003, *Einstein's Clocks, Poincare's Maps: Empires of Time*. New York, W. W. Norton & Company. 390p.
- Gurney, Alan, 2004, *Compass. A Story of Exploration and Innovation*, New York, W.W. Norton & Company. 320p.
- Harary, F., 1969, Graph Theory. Reading Mass. USA., Addison Wesley Publishing Company. 274 p.
- Hurn, J., 1989, GPS: A Guide to the Next Utility. Sunnyvale, CA., Trimble Navigation Ltd. 76 p.
- Lawrence, V. & Ackroyd, L. 2005, Developing the spatial data infrastructure of Great Britain. *Eighth United Nations Regional Cartographic Conference for the Americas*. New York, Naciones Unidas (E/CONF.96/I. P. 17.) 11 p.
- Loomis, J. M., et al., 1993, Nonvisual Navigation by Blind and Sighted: Assessment of Path Integration Ability. en *Journal of Experimental Psychology: General.* **122**, (1), 73-91.
- Marx, R. W.,1986, The TIGER System: Automating the Geographic Structure of The United States Census., en *Government Publications Review*, **13**, USA, Pergamon Press Ltd. 21 p.
- Morrison, J. L., 1995, What is the Status of Worldwide Topographic Mapping in the Twenty-first Century? en *Cambridge Conference for National Mapping Organizations 1995 Papers Presented*. Cambridge, U.K., Ordnance Survey. 328 p.
- Pace, S. et al., 1995, *The Global Positioning System. Assessing National Policies.*, Summary, 12 p., Appendix A, 18 p. y Appendix B, 33 p. de: http://www.rand.org/pubs/monograph\_reports/mr614/mr614/appb.pdf
- (R.A.E.) Real Academia Española, 1992, *Diccionario de la Lengua Española*, Vigésima primera edición, Madrid, Espasa Calpe. 2136 p.

- (R.A.E.) Real Academia Española, *Diccionario de la Lengua Española*, Vigésima segunda edición y avances de la vigésima tercera en: http://buscon.rae.es/drael/ (Septiembre, 2006)
- Reyes Guerrero, M. C., 1974, *Un Sistema Generador de Mapas*, Tesis profesional para obtener el título de Matemático, México D. F., Facultad de Ciencias, UNAM. 70 p.
- RFE, 1996, *Memoria Técnica de la Redistritación*. México D. F., Registro Federal de Electores. (No publicado).
- Schiller, J. y Voisard, A., 2004, *Location Based services*. San Francisco Morgan Kaufmann Publishers, Elsevier Inc. 256 p.
- Semaphore Corporation, 1987 2000, *B tree algorithms*, en http://www.semaphorecorp.com/btp/algo.html 4 p.
- Sheinbaum, C., 2005., Mexico City Facts, "*Principal Voices*", en http://www.principalvoices.com/mexico-facts
- Shermer, M., 2005, *Science Friction. Where the Known Meets the Unknown*. New York, Henry Holt and Company. 298 p.
- Smith, David Eugene, 1925, History of Mathematics, Vol I y II, New York, Dover Publications. 1322 p.
- Snyder, J. P.,1993, *Flattening the Earth: Two Thousand Years of Map Projections*. Chicago, The University of Chicago Press. 366 p.
- Snyder, J. P.,1987, *Map Projections A Working Manual*. U.S. Geological Survey Professional Paper 1395. Washington, D.C., United States Government Printing Office. 384 p.
- Stone, B. 2006. It's the Road Now Taken en Newsweek, April 11/April 18.
- Tobler, Waldo R., 1976, Analytical Cartography, en The American Cartographer, 3,(1), 21-31
- U.S. Bureau of the Census, 1970, *Census Use Study: The DIME Geocoding System,* Report No. 4, Washington D.C. 48 p.
- Wiener, N., 1967, *The Human Use of Human Beings: Cybernetics and Society.* New York, Avon Books. 288 p.
- Zhan, F. B., 1997, The Fastest Shortest Path Algorithms on Real Road Networks: Data Structures and Procedures. en *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, **1**, (1), pp 69-82, 1997. De http://publish.uwo.ca/~jmalczew/gida\_1/Zhan/Zhan.htm 12 p.
- Zhan, F. B., 1998, Unit 064 Representing Networks, en *NCGIA Core Curriculum in Geographic Information Science*. URL: "http://www.ncgia.ucsb.edu/giscc/units/u064/u064.html 12 p.
- Zhan, F. B., 2003, Notas de clase tomadas por RFJSS.