

# La conexión infinita



## César Lanza Suárez

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Director de Tecnova Ingeniería y Sistemas

### Resumen

La carretera es una construcción a la que el desarrollo ha ido convirtiendo en cosa cotidiana, nada especialmente nuevo o extraordinario se espera de ella más allá de servir con seguridad y eficiencia a un determinado modo de movilidad e ir reduciendo, en la medida de lo posible, sus externalidades desfavorables y, en particular, su impacto ambiental. Pero la carretera, o concretamente la carretera-red, constituye un apasionante objeto polisémico abierto a interpretaciones y estudios que superan los límites disciplinares convencionales de la ingeniería de Caminos y de las ciencias del territorio. Este artículo apunta a la topología, la combinatoria y la moderna teoría de grafos, como fuentes de conocimientos nuevos y apropiados para el análisis de esa singular y gigantesca estructura espacial desplegada sobre el territorio que constituye la carretera-red.

### Palabras clave

Carretera-red, territorio, teoría de grafos, topología, matemática combinatoria

### Abstract

Road as an engineering artifact has become commonplace. Nobody feels surprised these days for anything that roads can accomplish: an efficient and safe support to car mobility. The most people can expect from them is a thoughtful and environment-friendly design and some mitigation of undesirable externalities. But the road is not just infrastructure since it can be understood from many different ways beyond what we engineers tend to see. Roads or let say the road network can be analyzed too from disciplines other than civil engineering, geography or landscape architecture. This paper advocates the use of the new network science and its underlying disciplines topology, graph theory and combinatorial mathematics as an alternative framework to understand better that giant structure: the road network.

### Keywords

Road network, land, graph theory, topology, combinatorial mathematics

*La forma es lo finito, no lo infinito.  
La forma es la cárcel, la geometría del espíritu.*  
Cristóbal Serra

Quien desee adentrarse en la singularidad del valor<sup>1</sup> de la carretera desde la perspectiva de los estudios del territorio, paradójicamente no deberá perder de vista la variedad de posibilidades de análisis e interpretación que admite este tipo de obra pública, el más extendido y corriente de todas ellas –en el mejor sentido del término, por supuesto. La carretera, expresión de los arquetipos del camino y la vía en la era de la movilidad individual, motorizada y masiva, tiene algo que excita la imaginación del hombre contemporáneo tanto o más de lo que atrae a su razón. Dentro de los artefactos que aporta la ingeniería a la sociedad, la carretera es quizá el que más directamente remite al ideal prometeico de libertad, en este caso la de moverse por el territorio sin cortapisas significativas, sin límites. En tal contexto de idealidad real, la carretera es un ejemplo de construcción que roza el mito, el mundo de lo imaginario. Sartre apelaba a la imaginación en su condición de *fonction irréaliste de la conscience*<sup>2</sup>, dando a entender, sin embargo, que la activación de esa facultad no se produce como consecuencia de una huida desde la realidad material hacia lo etéreo o puramente ficticio, sino como consecuencia del ejercicio de capacidades humanas más apegadas a los hechos: la percepción, la memoria, la asociación de las ideas, la atención a las emociones, etc. Un poco de imaginación y veremos la carretera como una suerte de cordón umbilical que une al hombre con la noción de infinito, porque es precisamente la ausencia de límite lo que mejor sintetiza el mito de la libertad en nuestra civilización occidental.

La propia idea de infinito remite a una especie de plasticidad indefinida en la percepción de las magnitudes principales que circunscriben físicamente la experiencia humana: el tiempo y el espacio. Se piensa que ambas variables,  $s$  y  $t$ ,

estructuran el sentido de lo real, o más precisamente ayudan a hacer inteligible la realidad acotando las referencias existenciales de la historia y la geografía de cada uno. Aunque como dice Gromov<sup>3</sup>, “*ce n’est pas la nature qui nous impose le temps et l’espace, ce nous qui les imposons à la nature parce que nous les trouvons commodes*”. Es así como el infinito constituye en sí mismo un dilema u objeto imposible, ya que nos envuelve y obliga a la vez a abandonar nuestros propios límites referenciales, nuestra comodidad. Recuerda Ferrater Mora<sup>4</sup> que en el propio sustrato de la idea, durante el período clásico de conceptualización de la filosofía griega, ya se advierten huellas del rechazo, incluso del horror humano hacia el infinito, en gran parte por considerar que la razón es impotente para entenderlo. Esa es según parece la tesis de Spengler, que oponía la tendencia griega y apolínea hacia lo limitado y lo formado a la pulsión apasionada, faústica, hacia el infinito. En el pensamiento matemático, el infinito se da como necesidad; siendo un concepto que puede tenerse por domado o salvaje según los casos, no deja de constituir una incómoda amenaza. Así lo prueba la controvertida hipótesis del continuo, enunciada por Cantor en 1874, cuya indecibilidad dentro de axiomática ZFC se demostró casi un siglo más tarde y pende, cual espada de Damocles, sobre la consistencia lógica de la matemática o viceversa. Dicen que Grothendieck abandonó sus investigaciones, siendo aún un joven genio, precisamente por ese motivo (Fig. 1).



**Fig. 1.** La asociación de la carretera con una cierta idea de “lo infinito” se advierte en muchas obras de arte que la toman como motivo. En este caso, la pintura **Black Moon LN5** del artista californiano **Nicholas Woods**

Si el infinito como noción rebasa la condición humana, “lo infinito” en cambio constituye una categoría que puede llegar a resultar practicable o al menos aproximable por el hombre a través de su propia acción y experiencia. Una construcción que se acerca en ciertas propiedades y efectos a lo infinito es la carretera. La carretera admite miradas y lecturas muy diversas, pues no deja de ser muchas cosas a la vez. Por una parte es lo que conocemos en el sentido funcional y técnico propio de la ingeniería: una banda de rodadura trazada geoméricamente entre dos puntos sobre el territorio, acomodándose de la mejor manera posible a la orografía y a la que acompañan sus obras de paso y demás complicaciones. Pero además la carretera es un objeto multisémico, con tal riqueza de significados que nos trae al pensamiento aquel concepto feliz de *l’universo del senso*, que enunciaba Eco<sup>5</sup> tiempo atrás.

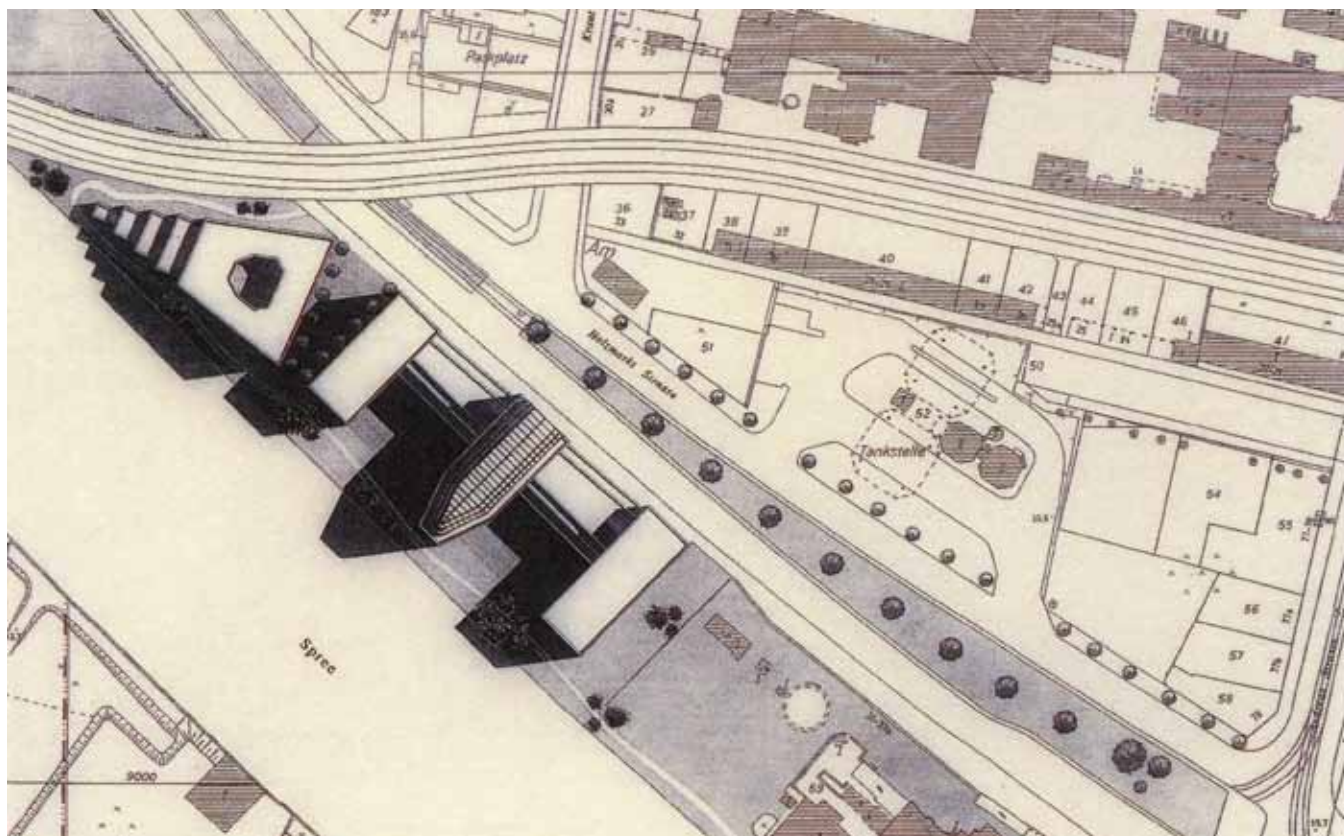
A los efectos que aquí interesan se tratará acerca de la carretera en su formulación estructural y macroscópica como red y no en la condición físico-funcional que considera la ingeniería. La carretera será aquí carretera-red, entendida como malla de vías que crean una gran estructura espacial de arcos y nodos sobre el territorio; un entramado que siendo físicamente finito lleva embebido, sin embargo, en su propia lógica interna el código de algo parecido a lo infinito. La carretera-red desborda cualquier delimitación origen-destino y su dualidad finito-infinito le confiere un valor singular como sistema estructurante del territorio. Desde ese punto de vista, el estudio de la carretera-red se abre a conocimientos que van más allá de las disciplinas clásicas del conocimiento del territorio y la ingeniería de Caminos. Una aproximación prometedora en tal sentido es la que pensamos que puede hacerse desde la topología, la matemática combinatoria y la teoría de grafos, que constituyen la base de la moderna ciencia de las redes. Pero como veremos, esa vía de ataque se encuentra aún en un estado relativamente incipiente y los instrumentos de análisis con que cuenta hoy el estudioso de estos temas ni son muy directos ni demasiado fáciles de aplicar a la compleja realidad del territorio y, en concreto, al papel que dentro de él juega la carretera-red.

### **Topología, ciudad y territorio**

La organización del territorio –y singularmente la urbanización– son actos humanos de ordenación espacial con un fuerte contenido topológico. Frente a la condición natural o primigenia de un determinado enclave cuyas características son puramente fisiográficas, la ordenación crea lugares, es decir espacios organizados y ocupados por el hombre en

base a principios de diseño, intuitivos o programáticos. De esos principios, unos son de naturaleza espacial geométrica, como los de alineación, forma, orientación o tamaño, mientras que otros distintos, como son los de conectividad, adyacencia, compacidad o persistencia –en el sentido de continuidad–, corresponden a propiedades esencialmente topológicas. Ciudad y territorio son espacios humanizados, es decir, lugares compuestos por una gran diversidad de entes, en gran medida creados artificialmente y relacionados entre sí; no deben verse como simples contenedores espaciales. En sus correspondientes escalas geográficas, ciudad y territorio son los lugares de relación y convivencia humanas; se pueden entender como continuos ordenados a partir de la articulación de todas esas partes constituyentes, que a su vez es posible analizar apoyándose en determinados tipos de estructuras u ontologías espaciales (Fig. 2).

El espacio urbano es el espacio humanizado por antonomasia, si bien no el único. A mayor escala geográfica, el territorio transformado por la acción del hombre se puede considerar como una extensión topológica del concepto de ciudad, al menos en algunas de sus propiedades. Entre las ontologías que conforman el territorio destacan singularmente por su ubicuidad las redes, estructuras que poseen –incluso intuitivamente– una marcada significación topológica. El estudio formal de las redes puede emprenderse desde un punto de vista cualitativo a través de sus propiedades intrínsecas, aunque para ello será preciso situarse en un plano distinto al de los hechos metrizable y sus métodos tradicionales de análisis. Además de las redes existen otras estructuras espaciales de indudable interés topológico, entre las que pueden mencionarse las fibras, los haces, las tramas o retículas y los nudos, tipos que también pueden encontrarse no solo como abstracciones o metáforas afortunadas sino



**Fig. 2.** En cualquier pieza del espacio humanizado, sea ciudad o territorio, subyace una topología que le imprime propiedades de significado diferente de las geométricas y seguramente más hondas. La imagen corresponde a un trabajo realizado por el arquitecto Aldo Rossi para el concurso Spree-Ufer en Berlín (1996)

adoptando distintas materializaciones en el contexto físico indicado. El conjunto de esas ontologías, sus propiedades, relaciones y variedades, constituye lo que podemos denominar la “facies topológica” del territorio.

Entenderemos por territorio la suma de los lugares diseñados por el hombre a partir de un ideario en torno a la noción de orden. En lo que se refiere en concreto a sus aspectos espaciales, prevalecen en el territorio dos clases de orden: el orden métrico y el orden topológico. El primero de ellos ha sido estudiado regularmente a lo largo de la historia, al menos desde la primera sistematización axiomática de la geometría (Euclides de Alejandría), tres siglos antes de la era cristiana. Arquitectos, ingenieros, agrimensores y astrónomos han tenido en la métrica euclídea un instrumento de primera importancia para la elaboración de sus teorías y en la realización de sus hechos. La geometría da lugar a representaciones operables de los objetos y de los espacios en torno al hombre, a partir de la formalización de dos categorías centrales: distancia y orientación. Ambas poseen un significado intuitivo, son percibidas por la vista, medibles y representables gráficamente. El orden geométrico se articula a partir de la idea de medida, es decir cuantificación de esas dos magnitudes fundamentales de longitud y ángulo en los espacios euclídeos de dos y tres dimensiones. La medida es una propiedad espacial que se obtiene por comparación, y por ello las relaciones geométricas pueden tratarse desde un punto de vista algebraico como relaciones de orden.

La topología, en cambio, se apoya en una conceptualización distinta del espacio, entendiendo este como un conjunto de entes diferenciados en base a otro tipo de categorías y procesos de transformación. El análisis topológico de los espacios organizados por el hombre desborda las nociones habituales de forma y geometría, y apunta hacia propiedades y relaciones intrínsecas de esos lugares, invariantes no necesariamente metrizables como se verá más adelante. En ese sentido, las interpretaciones topológicas de lo espacial en ciudad y territorio se diferencian conceptual y metodológicamente de los estudios morfológicos y más aún de los geográficos, cuya vocación omnicomprensiva tiende paradójicamente al campo de lo narrativo<sup>6</sup>. Al invocar la topología desde el ámbito disciplinar de los estudios espaciales del medio urbano y del territorio, se enriquece el análisis con conceptos y hechos cuya interpretación desborda las posibilidades de los métodos convencionales, sean cuantitativos o descriptivos.

Así como distancia y orientación son conceptos que desempeñan un papel nuclear en el establecimiento del orden métrico espacial, el orden topológico se manifiesta a partir de otras categorías que resultan esenciales para su propósito, entre las que sobresalen las de conectividad, adyacencia y compacidad. Ninguna de ellas posee un significado físico tan inmediato como el de sus homólogas métricas; no son igualmente representables ni pueden tratarse analíticamente de manera similar. Su propia definición se aleja en cierta medida del dominio de lo visual para situarse en un ámbito formal más abstracto: así, la conectividad se refiere a la imposibilidad de descomponer un determinado espacio o conjunto de objetos en subconjuntos disjuntos no vacíos, es decir desconectados entre sí; la adyacencia es una propiedad de los conjuntos abiertos que poseen algún borde común; la compacidad, por su parte, corresponde a la existencia de puntos de acumulación.

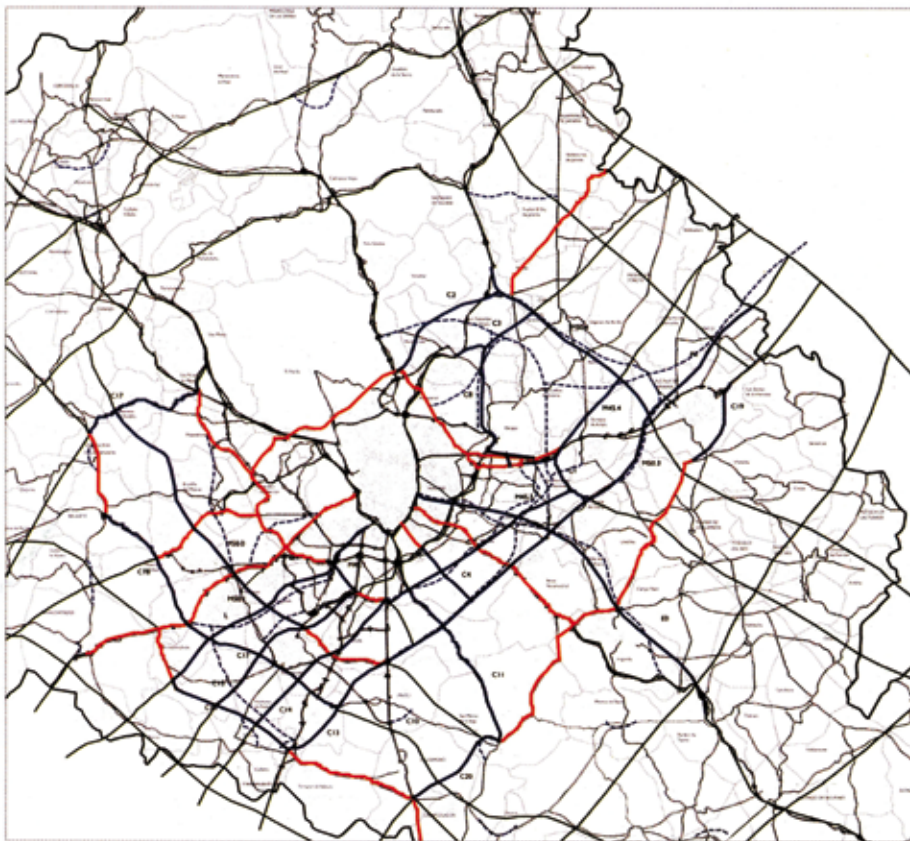
La topología se fundamenta esencialmente en relaciones espaciales de equivalencia, mientras que la geometría, como se indica anteriormente, se apoya en relaciones de orden. Los espacios topológicos pueden ser metrizables o no y además sobre un mismo espacio pueden darse varias topologías en concurrencia. La aplicación de los conceptos centrales de la topología al estudio de las propiedades, relaciones y variedades de las estructuras espaciales en ciudad y territorio, requieren una contextualización específica y cierta elaboración *ad-hoc*, como se explica más adelante. Fue el matemático Henri Poincaré quien abordó por vez primera la formalización de la topología como una rama específica del saber, a la que dio en su origen el nombre de *Analysis Situs*<sup>7</sup>. Sucedió aquello en el año 1895, y las palabras del propio fundador de la disciplina son elocuentes al explicar la necesidad de un modo de análisis espacial distinto del geométrico, anunciando una disciplina nueva cuya teoría y métodos eran entonces inexistentes. Por eso, Poincaré sentó las bases de la topología con el fin de estudiar cualitativamente el orden espacial asociado a propiedades y relaciones que trascienden los postulados y desarrollos de la ciencia fundada siglos atrás por Euclides. En sus propias palabras, “[...] *une méthode qui nous ferait connaître les relations qualitatives dans l'espace*”.

La geometría euclídea y sus derivaciones disciplinares han imperado históricamente entre los métodos científicos para el análisis de los hechos espaciales, de la misma manera que los métodos topológicos son aún una rareza, con la excepción parcial y con matices de la algoritmia subyacente a los



denominados sistemas de información geográfica o GIS<sup>8</sup>. El hecho anterior quizá se deba a la posición instrumental tan preponderante que ha alcanzado la geometría dentro de la física clásica, la naturalidad con que conecta el ejercicio de lo cognitivo con lo visual y también a su transversalidad que la hace estar presente un buen número de disciplinas científicas. Por el contrario, la abstracción de la topología, las categorías y conceptos que esta emplea y sus formas más difíciles de expresión operativa, la hacen poco conciliable con la inteligibilidad que requieren el urbanista o el organizador del territorio a la hora de interpretar a simple vista los espacios ordenados por el hombre. Sin embargo, creemos que la topología debe formar parte del bagaje de conocimientos que reclama justamente Miguel Aguiló<sup>9</sup> para “saber ver la ingeniería”, es decir para aprender a mirarla de tal manera que seamos capaces de penetrar con la visión en la estructura de los fenómenos, más allá de lo puramente formal o evidente (Fig. 3).

El análisis topológico de los espacios humanizados no se consigue mediante una aplicación directa y sin más de los principios de esa ciencia a la materialidad del territorio; exige una cierta adecuación disciplinar o acercamiento desde la abstracción matemática a la realidad concreta del medio físico y económico. La topología puede contribuir sustantivamente al estudio de las ontologías espaciales situadas en el dominio de ciudad y territorio en la medida que conecte con el acervo de conocimientos de la urbanística y de la ordenación territorial, con sus tradiciones científicas y culturales. Para ello será preciso enriquecer la investigación topológica con aportaciones cognitivas externas a esa ciencia matemática que hagan sus categorías más cálidas y legibles, modulando su pureza abstracta que es formalmente rigurosa, pero en ciertos aspectos elusiva o incluso hermética. Aportando con ello congruencia al significado del análisis topológico para acomodarlo a las irregularidades e imperfecciones reales que son inherentes, por su propia



**Fig. 3.** El plano muestra gráficamente la potencia del papel estructurante que ejerce la red de carreteras en el territorio, tomando en este caso como ejemplo el Plan Territorial de Madrid del año 1996

naturaleza, al espacio organizado por el ser humano, en particular el territorio y sus estructuras. En tal sentido, la carretera-red, que es la estructura mallada que predomina en la gran escala del espacio humanizado, constituye un interesante ejemplo para poner a prueba la aplicación de tales ideas y conceptos.

### **La carretera-red, expresión de la “facies topológica” del territorio**

La red es manifiestamente uno de los iconos de referencia del siglo XXI, un concepto que sin ser específicamente original de nuestro tiempo ha alcanzado tal importancia en el imaginario público, que hoy día se piensa que nada relevante puede existir al margen de las redes. Desde Internet a las redes sociales, en buena medida inmateriales, pasando por otras que poseen una presencia física mucho más evidente y consolidada como pueden ser las del transporte –de las cuales la carretera constituye una especialidad modal, quizá la más importante– las redes son ya omnipresentes. Y es la conjunción virtuosa que en ellas se produce de conectividad, interacción y más recientemente también “inteligencia” lo que ha ido dando cuerpo y sustancia a una idea que ya se anticipaba en la última década del siglo pasado: la sociedad en red<sup>10</sup>.

El análisis de las redes posee una base matemática en evolución permanente como prueba en los últimos años el crecimiento significativo de la panoplia de instrumentos teóricos, métodos y modelos, algoritmos, técnicas de representación y análisis<sup>11</sup> en manos de los estudiosos de la materia. La variedad de fenómenos interesantes y problemas que plantean las redes es impresionante, tanto en lo que se refiere a sus propiedades estructurales en diferentes escalas o niveles de referencia como en cuanto a los procesos que se dan sobre ellas y los efectos que causan o propagan más allá de su propio confín. Una buena parte de los temas actuales de estudio sobre las redes poseen una naturaleza estrictamente cuantitativa, por ejemplo los de caracterización de sus propiedades estructurales o los de optimización, pero no todos los problemas relevantes admiten ni aconsejan ese tipo de aproximación como se verá. El estudio de las redes complejas posee facetas cualitativas muy importantes en las que influye directamente la teoría moderna de grafos, punto de encuentro de la topología algebraica y la matemática combinatoria. Es precisamente en estas áreas fronterizas del conocimiento donde se producen las contribuciones más originales de los matemáticos, se encuentran las vías más prometedoras y surgen los resultados de mayor belleza en relación con las redes<sup>12</sup>.

Los problemas relacionados con el encaminamiento óptimo a través de redes –el criterio de optimalidad puede ser variable en múltiples sentidos– constituyen un clásico de la teoría elemental de grafos aplicada a la vialidad, que tuvo origen histórico en el conocido episodio de los puentes de Königsberg, mediando en el mismo el gran matemático Leonhard Euler. Su dedicación al rompecabezas conocido como Sieben Brücke von Königsberg concluyó en la demostración de la imposibilidad del deseado tránsito acíclico que permitiese a un viandante cruzar los dos brazos que forma el río Pregel alrededor de la isla de Kneiphof, atravesando cada uno de los siete puentes que en aquellos años había en la ciudad y regresar al punto de partida sin repetir el paso por ninguno de ellos. Euler dio cuenta de sus pesquisas en un informe presentado a la Academia de Ciencias de San Petersburgo en el año 1735 con el título “Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis”. Esa fecha se considera la de resolución del primer problema de naturaleza estrictamente topológica que aflora en el universo de la matemática, si bien la topología no existía aún como rama organizada y debidamente fundamentada dentro de esa ciencia. Es también un hito dentro de la aún más reciente teoría de la complejidad computacional, ya que se trata igualmente del primer ejemplo conocido de problema del tipo NP-completo<sup>13</sup>, cuya resolución exige unos recursos informáticos –espacio de memoria y ciclos de procesador– que escalan con su dimensión de manera no acotada polinómicamente (Fig. 4).

Más allá de curiosidades del pasado y conceptos abstractos, resulta interesante advertir cómo el estudio cualitativo de las redes malladas presenta aspectos estructurales en buena medida comunes con independencia de cuál sea su naturaleza física y el dominio concreto de implantación de que se trate: territorio, electricidad, comunicaciones y más recientemente las redes sociales. El ingeniero-arquitecto o viceversa Frei Otto es muy conocido internacionalmente por su reputación en el campo de las estructuras ligeras construidas con mallas de cables, pero al mismo tiempo es un personaje con inquietudes teóricas sobre el significado y efectos de las formas que crea el hombre, en el fondo las razones de su génesis. Otto publicaba hace cuatro años un interesante librito titulado “Occupying and Connecting<sup>14</sup>” en el que extiende sus reflexiones sobre este tipo de estructuras espaciales, las redes malladas, fuera de ámbito de lo resistente para situarlas en el contexto de la ordenación del territorio. En esa obra Frei Otto ha sido capaz de unir lo esencial que da una visión centrada en los aspectos



Fig. 4. Mapa de la ciudad prusiana de Königsberg, de la época en que Euler probó la irresolubilidad del problema del tránsito acíclico a través de los siete puentes tendidos entonces sobre el río Pregel

mecánico-estructurales de las mallas que se investigan en el Instituto de Estructuras Ligeras<sup>15</sup> de Stuttgart con otras perspectivas diferentes sobre el tipo particular de disposiciones espaciales que son las redes; en concreto con la interpretación que de ellas hacen los urbanistas y los planificadores del territorio con quienes el distinguido estructuralista ha trabajado en este caso estrechamente. La experiencia que puede extraerse de este trabajo de colaboración interdisciplinar no es solo válida a efectos del resultado obtenido, sino también en la medida que ilustra las dificultades del proceso de generación de conocimientos nuevos cuando confluyen visiones y especialidades tan diferentes en sus bases teóricas y en la praxis profesional. *“As it is often the case in interdisciplinary research projects, relatively long lead times were needed for various reasons. Different specialist languages, working methods and ways of thinking have to be understood by the partners, accepted or even adapted”*<sup>16</sup> reconoce el propio Otto, subrayando así el interés del reto y también los obstáculos encontrados en ese diálogo nada fácil entre disciplinas en torno al estudio de las propiedades intrínsecas de las mallas (Fig. 5).

El proceso de ocupación del territorio autoperpetúa la transformación del medio por la acción del hombre. El territorio cambia permanentemente a través de una sucesión de actos discretos que se superponen unos a otros, estableciendo un continuo espacio-temporal cuya dinámica es en buena

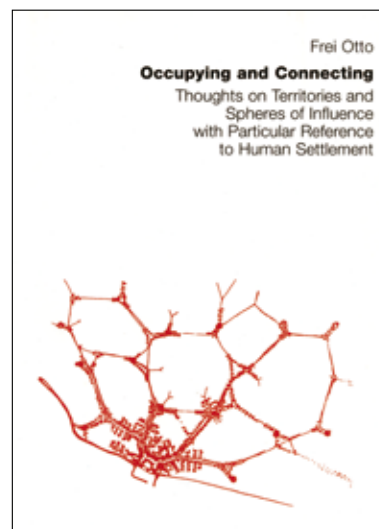


Fig. 5. Portada del libro de Frei Otto titulado: “Occupying and Connecting. Thoughts on Territories and Spheres of Influence with Particular Reference to Human Settlement”

medida consecuencia de los efectos que crean las distintas ontologías espaciales en él implantadas. De todo ello se posee una evidencia basada en la intuición y la constatación empírica; sin embargo el planificador raramente dispone de instrumentos analíticos y métodos adecuados para hacer frente a los hechos que como consecuencia de lo anterior se desencadenan sobre el territorio. Esto último es quizá una de las razones que arrojan duda sobre la eficacia, incluso la misma verosimilitud de la planificación territorial y sus especialidades sectoriales –entre ellas la del transporte– como disciplinas de contenido “científico” en un sentido más o menos positivista del término. También ayuda a explicar la impotencia que desde la propia actividad planificadora se expresa en ocasiones con tanta honestidad como resignación o abierto desencanto<sup>17</sup>.

A nadie sorprenderá reconocer que la carretera-red arrastra o induce la ocupación del territorio, lo cual es debido a que aquella permite localizar usos en su proximidad que se benefician de la propiedad principal que confiere al espacio en bruto: accesibilidad. Tal circunstancia se encuentra desde luego presente en las normas y el corpus doctrinal que rigen los estudios de planificación, el proyecto y la explotación de las vías de la red; igual en lo que se refiere a los instrumentos de planeamiento urbanístico al uso y la heurística de los planificadores. Pero se trata de efectos locales de atracción que pueden preverse con relativa facilidad y regularse me-

diante el simple ejercicio de la potestad normativa por parte de las autoridades directamente involucradas en la gestión del territorio, en esa misma escala y ámbito jurisdiccional de referencia. Lo que es más interesante –y bastante más difícil– a la hora de pensar la carretera como red y tratar de ver su influencia en los hechos del territorio son otro tipo de fenómenos y escalas. Y es precisamente ahí donde el estudio del territorio desde la topología, la combinatoria y los estudios analíticos basados en la teoría de grafos pueden desempeñar un papel relevante.

Diversos trabajos de investigación y propuestas efectuadas en ese sentido<sup>18</sup> ponen de manifiesto que tal posibilidad no deja indiferente a ninguna de las especialidades disciplinares que podemos considerar más directamente atraídas por esta cuestión: la ingeniería de Caminos, las ciencias del territorio –en particular la geografía– y también en menor medida la propia matemática. Resulta sin embargo un tanto decepcionante, aunque al mismo tiempo un estímulo para mentes inquietas, advertir que los estudios sobre la carretera que se emprenden desde la teoría de redes<sup>19</sup> se encuentran aún en un estado incipiente y están enfocados por lo general a la caracterización cuantitativa de las propiedades intrínsecas que presentan este tipo de estructuras desde el punto de vista considerado. Algunas de las características de la carretera-red que afloran en las investigaciones al uso corresponden a indicadores de estructura, como son el grado de conectividad nodal, los niveles de clustering, la centralidad, la distribución estadística de los encaminamientos de distancia mínima o la densidad espectral de la red<sup>20</sup>. En general provienen de la conocida teoría de Erdős-Rényi sobre grafos<sup>21</sup>, aunque los estudios más actuales suelen completar el modelo básico con algunas elaboraciones provenientes de la ciencia actual de las redes, asociadas a fenómenos del tipo *small-world* y *scale-free*. Más raramente inciden los trabajos conocidos en el análisis de los efectos externos que induce la carretera-red sobre el territorio y sus hechos, tema del que ya intuitivamente se puede esperar mayor complicación conceptual y de método.

Es indudable que la carretera-red altera extraordinariamente las condiciones de accesibilidad física del medio y lo hace en un doble sentido: por una parte conecta enclaves y por otra establece limitaciones a una cierta transversalidad isotrópica, si bien es cierto que esta propiedad suele tener un valor más teórico que realizable en la práctica, al menos desde el punto de vista de la importancia de los usos primarios del territorio. Las carreteras unen o cosen

enclaves en un sentido direccional que coincide físicamente con la orientación de su trazado en planta, pero al tiempo disocian, fragmentan y confinan territorios en los que anteriormente y por siglos prevaleció la idea de una cierta continuidad omnidireccional, al menos en potencia.

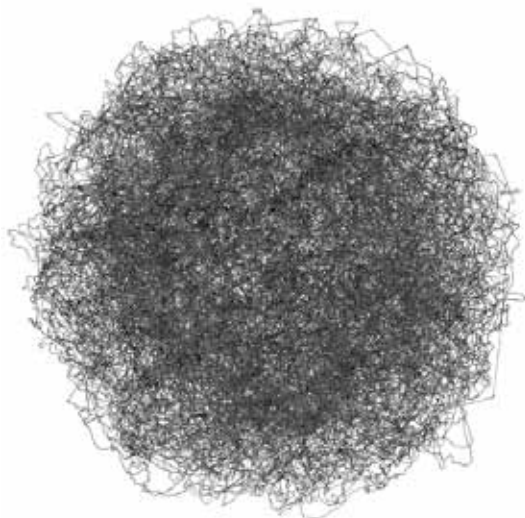
La carretera-red polariza el territorio, su medio natural de asentamiento, puesto que es una malla de bordes activos que tensionan y convierten en topológicamente anisótropos unos espacios que antes habrían sido razonablemente neutrales frente a esa noción potente de direccionalidad. La carretera en su papel de guía influye por otra parte en la percepción de las características fisionómicas del territorio y en especial del paisaje, que habla de distinta manera según el modo en que se le mira y también dependiendo de la situación relativa del punto de vista y las características de movimiento del observador, esencialmente su direccionalidad y variables cinemáticas relevantes.

La conjunción de esos factores puede conceder o detraer valor a la relación que mediada por la carretera-red se establece entre el medio y el ser humano. Argumentaban los Situacionistas que la circulación –por tanto la vialidad como factor físico habilitante de la misma– constituye un aspecto clave en la apropiación psico-geográfica del territorio, entendido como conjunto articulado de lugares y significados para quien lo recorre<sup>22</sup>. Desde esa posición extendieron el dominio espacial del tipo de espécimen urbano del *flâneur*, que había instaurado Baudelaire casi un siglo antes en sus divagaciones sobre París. Este gran modernizador de la poesía europea, que por otra parte inspiró positivamente a Walter Benjamin en su análisis crítico de la contextualidad urbana, describía su particular sentimiento hacia el arte de deambular en los términos siguientes: *“Pour le parfait flâneur, pour l’observateur passionné, c’est une immense jouissance que d’élire domicile dans le nombre, dans l’ondoyant, dans le mouvement, dans le fugitif et l’infini. Être hors de chez soi, et pourtant se sentir partout chez soi; voir le monde, être au centre du monde et rester caché au monde”*<sup>23</sup>. Una experimentación intelectual y sensorial del territorio como la que propugnaban Benjamin y los situacionistas, también depende en buena medida de las propiedades topológicas del camino que lo recorre.

#### **Interrogación final: ¿hacia una nueva teoría de la carretera-red?**

Territorio, carretera-red, paisaje... Son tan importantes las cosas que nos envuelven en la gran escala que deberíamos





**Fig. 6.** La creciente densificación y complejidad de las redes, también su aparente desorden espacial, quedan plasmados magníficamente en esta imagen del dibujo *Ceaseless Doodle*, obra de los jóvenes artistas turcos Özlem Günyol y Mustafa Kunt

tratar de verlas con mayor campo, haciendo uso de aquella metáfora de *les yeux fertiles* que invocaba Éluard, refiriéndose no tanto a los órganos de la vista como al propio intelecto humano. En asuntos polisémicos como son el territorio y sus elementos estructurantes, los estudios interdisciplinares parecen el instrumento adecuado para aplicar con propiedad los ingredientes teóricos y la visión plural que debería extenderse desde una actitud más vocacionalmente abierta y científica que de reserva gremial. Ello es aún más cierto cuando la confluencia de disciplinas une la joven e inmadura matemática de las redes con dominios más tradicionales de las ciencias del territorio, que normalmente elaboran desde planteamientos poco abstractos y apegados a alguna realidad física evidente del medio. No parece que sea precisamente trivial sintetizar con éxito conceptos y métodos realmente nuevos y además fructíferos para el estudio de la carretera-red, pongamos por caso, a partir del cuerpo de conocimientos que manejan habitualmente la ingeniería de Caminos, por un lado, y la moderna teoría de grafos o la matemática combinatoria por otro. A primera vista no se hace fácil intuir cómo ha de ser el crisol interdisciplinar capaz de lograr una virtuosa amalgama de las variables sobre capacidad e IMD de una carretera con el lema de Szemerédi<sup>24</sup>, o de los índices de accidentalidad y congestión viaria con los teoremas fundamentales de Ramsey<sup>25</sup>. Pero todo eso, queremos pensar y en cierto modo estamos convencidos, llegará.

La interdisciplinariedad deseada en torno a la carretera-red no es una simple acumulación de conocimientos de distinto origen y desde luego exige profundidad en los objetivos comunes y una estructura germinativa propia que alumbre conocimientos nuevos. Tiene mucha razón Frei Otto en lo que explica a este respecto en la obra suya que se ha mencionado antes. Parece que las aproximaciones desde la ciencia de las redes a los estudios territoriales aún no alcanzan lo que epistemólogos como Nagel<sup>26</sup> denominan un “status cognitivo completo” –*comprehensive*, en inglés– de tal manera que no se dispone aún de una teoría propiamente topológica del territorio y sus ontologías, en particular de la carretera-red. Tal teoría no se reducirá a un simple sistema de explicaciones basado en hipótesis, experimentos o extrapolaciones prestadas desde otros campos del conocimiento. La teoría nueva de la carretera-red ha de mostrar autonomía para capturar analíticamente mediante abstracciones propias lo esencial-estructural que aquella posee y lo que induce sobre el territorio en términos de localización de actividades, usos del suelo y dinámica urbana (Fig. 6).

En algún momento se ha mencionado en este artículo a Manuel Castells, quien supo anticipar a través del término “sociedad en red” o “sociedad-red” lo que hoy ya es un patrón de la forma contemporánea de vivir, en un sentido general que trasciende ampliamente la noción de desplazamiento. Muchos años antes, en 1972, Castells había escrito desde su exilio en París un libro en ciertos aspectos sorprendente aunque a la postre errado en algunas de sus predicciones más llamativas. Ese libro se titulaba “*La Question urbaine*” y pretendía ser un tratado de urbanismo marxista, es decir una lectura del espacio humanizado desde los principios dogmáticos de materialismo dialéctico, tomando a la ciudad como medio donde se desenvolvería la “lucha de clases”. A pesar de los yerros, el ilustre sociólogo acertó al ver entonces entre los elementos de la estructura espacial determinantes de la urbanización la importancia de aquellos vinculados al intercambio, y por tanto más o menos de lo que aquí hemos querido denominar la carretera-red. Suyas son –o eran entonces– las palabras siguientes: “El análisis de la circulación debe entenderse como una especificación de una teoría más general del intercambio entre los componentes del sistema urbano [...] la circulación tiene lugar en un espacio social determinado, modelado principalmente por las propias conexiones del transporte”. Sin decir mucho, aquí Castells trató de decirlo todo. **ROP**

**Notas**

- (1) Entiéndase aquí (y en general a lo largo de este escrito) el valor como valor intrínseco o axiológico, más que utilidad.
- (2) L'imaginaire; Jean-Paul Sartre. Éditions Gallimard, 1986.
- (3) Misha Gromov, matemático francés de origen ruso, galardonado con el premio Abel ('el Nobel de las matemáticas') en el año 2009. La cita proviene de la publicación *Introduction aux mystères*, editada por Actes Sud con motivo de la exposición *Mathématiques, un dépaysement soudain*. Organizada de Octubre de 2011 a Marzo de 2012 por la Fundación Cartier para el arte contemporáneo en París, fue fruto de la colaboración de Gromov con el artista David Lynch.
- (4) Diccionario de Filosofía; José Ferrater Mora. Ariel, 1994.
- (5) *La struttura assente. La ricerca semiotica e il metodo strutturale*; Umberto Eco. RCS Libri, 1968.
- (6) Véase *Analyse Urbaine*; Philippe Pannerai, Jean-Charles Depaule y Marcelle Demorgon. Éditions Parenthèses, 1999.
- (7) *Analysis Situs*; Henri Poincaré. *Journal de l'École Polytechnique*, 2-1, 1895.
- (8) Una visión interesante sobre el uso de conceptos y métodos topológicos en los GIS puede encontrarse en *GIS: A Computing Perspective*; Michael Worboys y Matt Duckham. CRC Press, 2004.
- (9) *Saber ver la Ingeniería*; Miguel Aguiló, Javier Manterola. *Revista de Obras Públicas* nº 3497, Marzo de 2009.
- (10) Este término fue acuñado por Manuel Castells, sociólogo español afincado en Berkeley en su obra *The Rise of the Network Society*. Blackwell Publishers, 1996.
- (11) Véanse por ejemplo las secciones II, III y IV de *Networks – An Introduction*; Mark E. J. Newman. Oxford University Press, 2010.
- (12) El lector interesado puede consultar la obra siguiente: *Modern Graph Theory*; Béla Bollobás. Springer, 1998.
- (13) Sobre el fascinante tema de la complejidad computacional y sus clases puede consultarse el libro *Computational Complexity*; Christos H. Papadimitriou. Addison-Wesley, 1994.
- (14) El título completo y la referencia son los siguientes: *Occupying and Connecting. Thoughts on Territories and Spheres of Influence with Particular Reference to Human Settlement*; Frei Otto. Edition Axel Menges, 2009.
- (15) *Flächentragwerke*. Centro de investigación sobre estructuras tensiles, fundado por Frei Otto en el año 1964 en la universidad de Stuttgart y dirigido por él mismo hasta su jubilación académica.
- (16) Véase el libro a que se refiere la nota 13.
- (17) Véase en ese sentido el Editorial de la revista *Urban* nº4 – *Planeamiento urbano y territorial en el siglo XXI (1ª parte)*, que recoge las ponencias del Seminario Internacional con el mismo título, organizado por el Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio de la ETSAM – UPM en Noviembre de 1999.
- (18) Pueden consultarse por ejemplo algunos trabajos realizados dentro de España, con enfoques algo dispares y distanciados en el tiempo, entre ellos los de Garrido Palacios, Herce Vallejo o Brunet Estarellas. De las referencias internacionales sobre la materia cabe destacar el libro *Mathematical Analysis of Urban Networks (Understanding Complex Systems)*; Philippe Blanchard y Dimitri Volchenkov. Springer, 2009.
- (19) Un trabajo interesante en esta línea se presentó en el Seminar *Infrastructure Reliability*, TU Delft – Junio 2006. La ponencia se titulaba *Topological Characteristics of the Dutch Road Infrastructure* siendo sus autores A. Jamakovic, H. Wang y P. Van Mieghem, todos pertenecientes al ámbito académico.
- (20) Una definición operativa de los conceptos utilizados en el estudio puede encontrarse en *The Structure and Dynamics of Networks*; Mark Newman, Albert-László Barabási y Duncan J. Watts. The Princeton Press, 2006.
- (21) *On Random Graphs*; Paul Erdős y Alfréd Rényi. *Publicationes Mathematicae* 6, 1959. El modelo de Erdős-Rényi posee la ventaja de que muchas de las características analizadas en los grafos pueden expresarse analíticamente y son fácilmente computables.
- (22) Véase *Positions Situationnistes sur la circulation en Internationale Situationniste*; Guy Debord. Fayard, 1997.
- (23) *Le Peintre de la vie moderne*; Charles Baudelaire. Fayard, 2010.
- (24) El lema de regularidad de Szemerédi constituye uno de los principios fundamentales de la teoría actual de grafos, y sirve en concreto para la clasificación estructural de los grandes grafos como puede ser la carretera-red. Su autor es el matemático Endre Szemerédi, de origen húngaro, profesor de la universidad de Rutgers en los EEUU y premio Abel en 2012.
- (25) La teoría de Ramsey aplicada a los grafos busca regularidad en medio del desorden, es decir condiciones generales para la existencia de subestructuras con propiedades regulares. Frank Plumpton Ramsey fue un conocido matemático de la universidad de Cambridge que también hizo contribuciones a la teoría económica, de hecho trabajó con J.M. Keynes en diversos temas sobre probabilidad.
- (26) Véase *The Structure of Science. Problems in the Logic of Scientific Explanation*; Ernest Nagel. Hackett Publishing Company, 1979.
- (27) Actualmente profesor de Sociología y Urbanismo en la universidad de California en Berkeley.
- (28) La edición española se titula *La cuestión urbana*, y fue editada en 1974 por Siglo XXI de España Editores.