02-016

ANALYSIS OF ROAD CONNECTIVITY FOR URBAN PLANNING: CASES OF STUDIES VALPARAÍSO (CHILE) AND VALENCIA (SPAIN)

Matus, José M. (1); Herrera, Rodrigo F. (1); Atencio, Edison (1); Pellicer, Eugenio (2)

(1) Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, (2) Universitat Politècnica de València

For the city urban planning it is necessary to consider all the characteristics that define it by identifying and organizing the multiple parameters that create the road network. These are linked to form an optimizable structure, facilitating future processes, technical and political, involved with the space development and design of the space and the built environment of the city. The objective of this work is to carry out an analysis of urban road connectivity as an entry element for decision makers regarding city planning. It is offered to make a diagnosis of the current situation of the connectivity of the city, then a modeling of the urban area as an interconnected network with nodes and arcs with relevant information to characterize the system. Using graph theory as a modeling tool, different problems were identified, which were related to modularity of graph, centrality and the heights of nodes. To exemplify the use of the methodology, a comparative analysis was carried out between the cities of Valparaíso, Chile; and Valencia, Spain. Both cities have similar characteristics in regards its status as a harbor city, university and tourist center. The results indicate that the urban road network allows to reduce the low connectivity.

Keywords: *road connectivity; urban developent; urban planning; graph theory*

ANÁLISIS DE CONECTIVIDAD VIAL PARA LA PLANIFICACIÓN URBANA: CASOS DE ESTUDIOS VALPARAÍSO (CHILE) Y VALENCIA (ESPAÑA)

Para la planificación urbana de una ciudad es necesario considerar todas las características que la definen, identificar y organizar los múltiples parámetros que componen la red vial. Éstos se vinculan formando una estructura optimizable, facilitando los procesos futuros, técnicos y políticos, involucrados con el desarrollo y diseño del espacio y el entorno construido de la ciudad. El objetivo de este trabajo es realizar un análisis de conectividad vial urbana como elemento de entrada para los tomadores de decisión respecto a la planificación de la ciudad. Se propone hacer un diagnóstico de la situación actual de la conectividad de la ciudad, luego una modelación de la zona urbana como una red interconectada con nodos y arcos con información relevante que permitan caracterizar el sistema. Utilizando como herramienta de modelamiento la teoría de grafos se identificaron diferentes problemas, vinculados a la modularidad del grafo, su centralidad y cota de los nodos. Para ejemplificar el uso de la metodología se realizó un análisis comparativo entre las ciudades de Valparaíso, Chile y Valencia, España, con características similares en lo que respecta por su condición de ciudad-puerto, polo universitario y turístico. Los resultados indican que la red vial urbana permite reducir la baja conectividad.

Palabras clave: *conectividad vial; desarrollo urbano; planificación urbana; teoría de grafos*

Correspondencia: Rodrigo F. Herera rodrigo.herrera@pucv.cl

Acknowledgements/Agradecimientos: CONICYT - PCHA National Doctorate/2018 - 21180884

CORFO Project 14ENI2-26905 Ingeniería 2030-PUCV

©2019 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

1. Introducción

La tendencia mundial a la progresiva concentración de la población y sus actividades económicas en la ciudad ha llevado a un incremento en la complejidad de su estructura y funcionamiento, haciendo del manejo y planeamiento urbano un reto cada vez más desafiante (Strano et al. 2012). Esta problemática es abordada por la Planificación Urbana y dentro de los aspectos a considerar a la hora de realizar un estudio se encuentran: la estructura de red urbana existente, los propósitos de los movimientos cotidianos, la elección del modo de transporte, el tiempo de ejecución del transporte y los costes relacionados a esta actividad; estableciendo los criterios para el desarrollo de un sistema urbano óptimo limitado por las restricciones que rigen el movimiento entre zonas geográficas (Wilson, Tewdwr-jones, & Comber 2019).

De los diversos medios de trasporte existentes para desplazarse en una ciudad, los automóviles cumplen un rol fundamental, trasladando la mayor cantidad de personas, bienes e información, en comparación a medios de trasporte no motorizados, aéreos y marítimos (Leibowicz 2018). Además, numerosos estudios de los sistemas de transporte urbano y el funcionamiento de sus redes viales (Porta, Crucitti, & Latora 2006a; Tsiotas & Polyzos 2017; Sharifi 2019) justifican la topología de la red como un factor determinante para la movilidad y el desarrollo de la ciudad. Es por esto que la red vial urbana es la columna vertebral de una ciudad, la cual permite su funcionamiento.

Para definir correctamente la red es importante entender las diferentes propiedades que caracterizan a cada ciudad, como los roles que cumplen en sus países respectivos, su historia y características geográficas, las cuales demarcan la dirección y la forma en que ocurre el desarrollo urbano en el tiempo (Deng, Fu, & Sun 2018). La función que cumplen las ciudades está dada por las demandas de las personas que la habitan, vinculado con los antecedentes culturales, sociales y económicos (Ingvardson & Nielsen 2018). Por otra parte, las ciudades fundadas en la época medieval cuentan con estructuras que difieren de las establecidas en la era moderna, por lo general, mientras las urbes medievales tienen patrones de calles irregulares, cortas y torcidas, las urbanizaciones modernas tienen una estructura con patrones regulares, rectilíneos y ortogonales (Porta, Crucitti, & Latora 2006b). De igual manera, la topografía es otro factor que caracteriza el patrón de las calles, las ciudades en las llanuras, montañas y/o junto al mar tienen sus propias estructuras distintivas, limitadas por las restricciones geográficas, geológicas y geotécnicas del sitio (Andriamamonjisoa & Hubert-Ferrari 2019). Estos factores de las ciudades funcionan simultáneamente como causa y efecto de la organización de la red de calles.

Una herramienta que permite interconectar los elementos que componen la estructura de una ciudad es el análisis de redes, el cual permite modelar y estudiar elementos interconectados, a través de la teoría de grafos, ofreciendo una importante metodología para el estudio del funcionamiento y optimización de los sistemas(Kong et al. 2019). En el caso de redes viales urbanas supone una potente herramienta que ha permitido examinar las ciudades desde una perspectiva de red compleja, incorporando parámetros deseados de interés en el modelo matemático. Investigaciones sobre la estructura y topología de redes viales urbanas utilizando redes complejas han demostrado la existencia de similitudes cuantitativas entre redes de carreteras de ciudades con diferentes áreas geográficas, para diversos tipos de estructuras urbanas (Albert & Barabási 2002), tanto en forma como en características socioeconómicas (Chan, Donner, & Lämmer 2011; Buhl et al. 2006; Cardillo et al. 2006).

Si bien se puede deducir que las características geográficas tienen un impacto en el desarrollo de la ciudad y en la eficiencia de su conectividad, no existe evidencia cuantitativa de dicho impacto y las problemáticas que se generan a partir de ésta. Tampoco, se ha discutido de cómo el análisis de redes puede aportar con información a los tomadores de decisión de la planificación urbana de la ciudad. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es entregar información del análisis de redes como elemento de entrada para los tomadores de decisión en lo que respecta a planificación de la ciudad, a través de una modelación de la zona urbana como una red interconectada con nodos y arcos con información relevante que permitan caracterizar el sistema, utilizando como herramienta de modelamiento la teoría de grafos. Esta metodología permite hacer un diagnóstico de la situación actual de la conectividad de la ciudad. Para ejemplificar su uso se realizó un análisis comparativo entre las ciudades de Valparaíso, Chile, y Valencia, España, con características similares en lo que respecta por su condición de ciudad-puerto, polo universitario y turístico, aunque con diferencias desde el punto de vista geográfico.

Para representar ciudades a través de teoría de grafos, una gran parte de la literatura se ha dedicado a la caracterización cuantitativa de las propiedades geométricas y topológicas en los datos de la red, tales como: el grado de nodo, el coeficiente de agrupamiento, el número de ciclos, el diámetro de la red y la longitud de la trayectoria, revelando interesantes regularidades estadísticas entre el modelo y la realidad de la ciudad (Chan, Donner, & Lämmer 2011). Otras investigaciones se enfocan en la medición de los índices de centralidad: “betweenness centrality”, “closeness centrality”, “straightness centrality” e “information centrality” (Lee & Jung 2018). La evaluación basada en la centralidad ofrece una conveniente forma de capturar la distribución desigual entre sectores, identificando cuales tiene un menor grado de interacción con el resto de la red. La Tabla 1 describe métricas utilizadas relacionadas a la red; la Tabla 2 describe las métricas de los nodos.

Tabla 1. Descripción de las métricas generales en análisis de redes (Cherven 2013)

Métrica	Descripción
Average degree	número de conexiones promedio que tiene cada nodo dentro de la red
Average weighted degree	suma promedio de los pesos de aristas conectada a cada nodo
Diameter	cantidad de nodos de distancia entre los dos nodos más alejados entre sí de la red

Tras el análisis de las métricas se realiza un diagnóstico y estudio de conectividad vial, dando paso a las recomendaciones para la futura planificación vial urbana de la ciudad. El alcance de la planificación de la ciudad incluye una gama de decisiones interdependientes en el ámbito de las esferas pública y privada (Park & Andrews 2004), y sirve como guía para el crecimiento de una ciudad, trayendo numerosos efectos positivos en el desarrollo y bienestar de la población (Deng, Fu, & Sun 2018).

2. Casos de estudio

Para el estudio de conectividad vial, a través del análisis de redes, se comparan la ciudad de Valencia, España, y la ciudad de Valparaíso, Chile. Valencia es una ciudad española situada a orillas del río Turia, en la costa levantina de la península ibérica, es la tercera ciudad y forma parte de la tercera área metropolitana más poblada de España (Instituto Nacional de Estadistica (INE) 2018a). Su casco histórico es el más extenso de la Península Ibérica, con aproximadamente 169 hectáreas (Oficina d’Estadística Ajuntament de València 2009); su patrimonio histórico y monumental y sus diversos espacios escénicos y culturales la

convierten en unas de las ciudades con mayor afluencia de turismo nacional e internacional de todo el país. Además, la ciudad ofrece variados programas universitarios, atrayendo estudiantes de diversas partes de España, Europa y Latinoamérica. Al sureste, dentro del núcleo urbano, se emplaza el quinto puerto con más tráfico en Europa, siendo también el más grande de España y la cuenca del Mar Mediterráneo (Ministerio de Fomento 2017). El puerto de Valencia cumple un rol fundamental como una de las principales actividades económicas de la región.

Tabla 2. Métricas de nodos en análisis de redes (Cherven 2015)

Métrica	Descripción
Closeness Centrality	Corresponde al nivel de influencia de los nodos en base a las rutas más cortas de un nodo a sus vecinos bien conectados
Betweenness Centrality	Corresponde al nivel en el que cualquier nodo sirve como un puente que conecta otros nodos
Eigen Centrality	Corresponde al nivel relativo asignado a los nodos según las conexiones a nodos más influyentes contribuyendo mayor valor a la métrica que las conexiones con nodos menos influyentes
Modularity class	Representa la comunidad a la que pertenece cada nodo de la red, definida por la modularidad

Valparaíso es una ciudad costera de Chile, forma parte de la tercera área metropolitana más poblada del país (Instituto Nacional de Estadistica (INE) 2018b), conocida por sus cerros coloridos y sus ascensores, que aportan en la conectividad de zonas altas. La ciudad se caracteriza por ser la sede del poder legislativo, albergando al Congreso Nacional. Es también un importante centro de turismo urbano que recibe viajeros de diferentes nacionalidades atraídos, principalmente, por su arquitectura reconocida por la UNESCO como Patrimonio de la Humanidad. La región posee dos importantes puertos de embarque de diversos tipos de productos, que son San Antonio y Valparaíso. Este último ha tenido un rol histórico como puerto de la región central de Chile y conexión con el océano pacífico. Además, estudiantes de diferentes regiones del país eligen la ciudad de Valparaíso para estudios superiores, atraídos por la oferta universitaria en la zona (Biblioteca del Congreso Nacional 2018). La Tabla 3 muestra datos descriptivos de ambas ciudades. Dentro de las principales características que difieren entre Valencia y Valparaíso se encuentra el factor geográfico y demográfico, vinculado con el crecimiento de ambas ciudades.

Tabla 3: Característica Geográficas y demográficas de Valencia y Valparaíso.

	Valencia, España	Valparaíso, Chile
Ubicación	39°28′00″N 0°22′30″O	33°02′45″S 71°36′59″O
Habitantes	791.413 hab. (2018)	296.655 hab. (2017)
Superficie	*134,65 km²	*401,6 km²
Densidad	5.850,78 hab./km²	738,68 hab./km²
Cota Máxima	24 m	448 m

Nota: *correspondiente a la superficie considerada en el modelo.

Para la planificación vial urbana, es necesario organizar los múltiples factores que componen la ciudad, de los cuales, Valencia y Valparaíso tienen en común su valor patrimonial con gran atractivo turístico. Esto convive con la actividad portuaria de gran importancia para la economía su país respectivo y una significativa población estudiantil. Al vincular esta información es posible obtener una red, que sirve de herramienta para la planificación urbana, capaz de definir los procesos futuros técnicos y políticos involucrados con el desarrollo y diseño del espacio y el entorno construido de la ciudad.

Por medio de un software de teoría de grafos es posible modelar Valencia y Valparaíso

como una red interconectada con arcos y nodos. En ciudades, un grafo corresponde a red vial urbana, donde los nodos son las intersecciones entre calles y los arcos los tramos de calle que unen esos nodos. Los nodos quedan definidos por su posición geo-referenciada, en cuando a latitud, longitud y cota, y el distrito al cual pertenecen. Para modelar un arco (calles) se consideró la siguiente información: el nombre de la calle, el sentido de la vía, en ambas direcciones (link no dirigido) y en una dirección (link dirigido), y la cantidad de pistas por sentido, en donde se definió un peso mayor a medida que la calle tuviera más pistas.

Después, se realizó la caracterización cuantitativa de las propiedades geométricas y topológicas de cada red y sus nodos (según métricas indicadas en la Tabla 1). Además, se obtuvo la modularidad de los nodos de la red, la cual representa una clasificación de los distintos sectores, a través de las conexiones relativas entre nodos. Se analizó si las clases de modularidad tenían algún tipo de relación con la división política territorial de cada una de las ciudades. Luego, se analizaron las métricas de centralidad (según métricas indicadas en la Tabla 2), con el fin de reconocer áreas de distribución desigual, es decir, zonas de la ciudad más aisladas; de esta manera es posible identificar problemáticas referentes a espacio y desarrollo urbano. Por último, se plantean recomendaciones del uso de esta información para la planificación urbana de las ciudades.

3. Resultados

En la Tabla 4 se presentan las métricas de caracterización cuantitativa de las propiedades geométricas de cada red, obtenidas mediante los modelos en teoría de grafos para Valencia y Valparaíso.

Tabla 4: Métricas de la Red de Valencia y Valparaíso.

	Valencia	Valparaíso
Nodes	3.492	2.320
Edges	5.760	3.454
Average Degree	3,29	2,98
Average Weighted Degree	7,03	6,62
Network Diameter	56	73

La ciudad de Valencia posee un mayor número de vías que Valparaíso, obteniendo más nodos de análisis, que están ubicados en las intersecciones de estas vías. Al considerar la superficie modelada de ambas ciudades (Tabla 3), es posible observar la relación inversa entre la cantidad de elementos (nodos) y el tamaño de las redes. Esto se debe a grandes superficies en Valparaíso que se encuentran dentro de los límites de la gran vía perimetral pero que presentan una red vial discontinua, con nodos alejados entre sí; por esta misma razón el diámetro de la red es mayor: Valencia muestra una mayor ocupación del espacio modelado. El grado de conexiones promedio que tiene cada nodo dentro de la red es mayor en las intersecciones valencianas, incorporando la cantidad de pistas por sentido. Esta diferencia con Valparaíso aumenta, pues Valencia cuenta con grandes vías de hasta seis pistas por sentido en su estructura, mientras que gran parte de las calles de Valparaíso son de una pista por sentido, exceptuando las vías perimetrales. La caracterización cuantitativa de las propiedades geométricas y topológicas en los datos de la red, entregan métricas estadísticas por nodo, las cuales se analizan con respecto a la organización territorial, centralidad y elevación para ambas ciudades

3.1. Organización territorial de Valencia y Valparaíso

Valencia está dividido políticamente en 19 distritos, muchos de ellos incorporados a la ciudad debido al crecimiento de la urbe, en un fenómeno llamado conurbación; la Figura 1a

muestra la distribución de la ciudad y su separación por distritos. Por su parte, Valparaíso se divide políticamente en 47 zonas delimitadas principalmente por la geografía, siendo las quebradas de los cerros las fronteras naturales entre estos; la Figura 1b muestra los cerros que componen la ciudad.

Figura 1: Distribución política de (a) Valencia y (b) Valparaíso

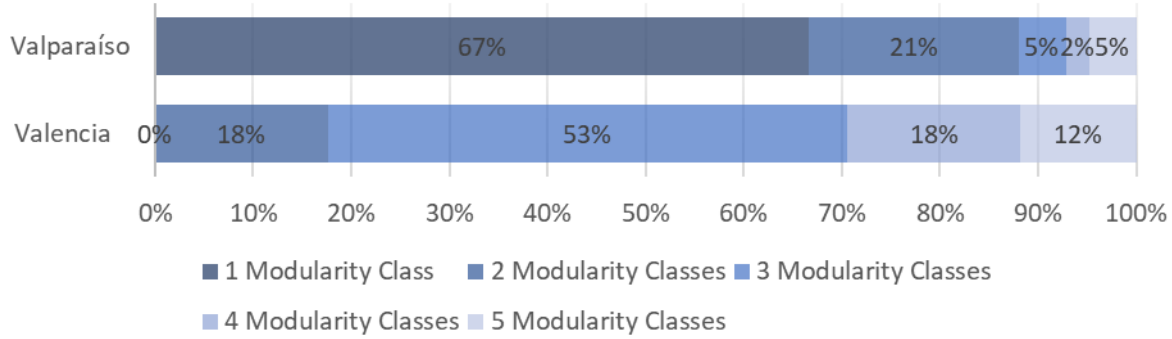
Al ejecutar el análisis de redes se puede obtener la modularidad de la ciudad, la cual muestra cuán densas son las conexiones entre los nodos dentro de cada módulo (comunidades) en comparación con los otros, generando una distribución de la ciudad en base a grupos con mejor conexión. La Figura 2a muestra las 28 comunidades obtenidas en Valencia, mientras la Figura 2b muestra las 30 comunidades identificadas por el algoritmo en la ciudad de Valparaíso.

Figura 2: Modularidad de (a) Valencia y (b) Valparaíso

Para estudiar la relación entre la división política-territorial de la ciudad y la modularidad, se utiliza un análisis de frecuencia relativa, donde cada distrito es caracterizado por el número de Modularity Classes de los nodos que lo conforman. A través del análisis es posible determinar qué tan dividido se encuentra, en términos de las conexiones relativas entre nodos, cada uno de los distritos de las dos ciudades en estudio. Considerando los distritos de cada una de las ciudades como el total, se asigna un conteo de Mularity Classes que lo conforman, existiendo distritos formados por nodos pertenecientes a solo una Modularity

Class, hasta otros con hasta cinco Modularity Classes en su estructura. De esta manera queda representado el número de distritos, con respecto al total, conformados por una, dos, tres, cuatro y cinco Modularity Classes para cada una de las ciudades.

Figura 3: Modularity Classes para cada Distrito en (a) Valencia y (b) Valparaíso



La Figura 3 muestra que en la ciudad de Valencia no existen distritos cuyas conexiones relativas entre nodos se encuentren definidas por una comunidad (Modularity Class), pero que si comparten la estructura con más comunidades, exponiendo conectividad entre distritos. En cambio en Valparaíso, más de un 60% de los distritos están definidos por una comunidad; esto se debe a que la división política-territorial en la ciudad de Valparaíso esta delimitada por fronteras geográficas, las cuales dirigen el desarrollo de la ciudad a la formación de comunidades fuertemente conectadas entre sí, pero con un menos grado de conexión entre ellas. Mientras los distritos valencianos están formados por subgrupos interconectados, donde la división política-territorial abarca entre dos a cinco comunidades definidas en cuanto a conectividad de la red, Valparaíso cuenta con una división que en mayor parte se corresponde con la modularidad entregada por el análisis de la red vial urbana.

3.2. Centralidad de Valencia y Valparaíso

La red vial de Valencia presenta una estructura radial, con varios ejes concéntricos y vías perpendiculares, es así como el desarrollo de la ciudad viene dado perimetralmente, de esta manera en su crecimiento la ciudad ha ido agregando vías concéntricas para favorecer la conectividad, llegando al borde costero. Por otro lado, Valparaíso ha mostrado un crecimiento guiado por la geografía del lugar, con una sola gran vía perimetral que se conectas a las diferentes zonas de la ciudad, por lo que la mayoría de las vías cumplen la función de conectar con la zona central. A diferencia de Valencia, el desarrollo de Valparaíso nace desde la zona costera hacía los cerros, geografía que dificulta la implementación de una estructura homogénea.

Eigen centrality mide influencia de un nodo en una red. Un valor de vector propio alto significa que un nodo está conectado a muchos nodos que tienen valores altos. En Valencia la Figura 4a muestra valores homogéneos, dejando en evidencia una red vial urbana donde la mayoría de los nodos son influyentes. En cambio, la red de la Figura 4b de Valparaíso muestra valores altos en las zonas céntricas de la ciudad y en algunos casos en los centros geográficos de los distritos, mientras las periferias muestran valores bajos, siendo considerados nodos menos influyentes y con difícil acceso a los más influyentes.

Figura 4: Eigen centrality en (a) Valencia y (b) Valparaíso

Closeness centrality muestra grado de proximidad a todos los demás nodos de una red, los nodos más centrales tienden a tener una Closeness centrality grande. Para Valencia, la Figura 5a muestra la función central de las vías aledañas al rio, con valores mayores de Closeness centrality, capaz de ampliar la conexión de las otras zonas al centro de la red, representando el caso, en el que nodos de estos distritos lejanos al centro en un sentido directo, pero influyente debido a la proximidad de nodos vecinos bien conectados de las grandes vías. En la Figura 5b la red vial de Valparaíso muestra una distribución coincidente con la centralidad geográfica, donde los nodos posicionados en el centro geométrico de la ciudad tienen mayor Closeness centrality y no se ven afectados por la influencia de grandes vías que podrían conectar zonas de mejor manera con el centro.

Figura 5: Closeness centrality en (a) Valencia y (b) Valparaíso

Betweenness centrality corresponde al nivel en el que cualquier nodo sirve como un puente que conecta otros nodos e indica la importancia de un nodo en términos de las rutas más

cortas. Los valores altos de Betweenness centrality están relacionados con los grandes volúmenes de tráfico, lo que significa que son las vías vulnerables a la congestión vehicular.

La Figura 6a muestra como en Valencia los valores altos se encuentran en las vías radiales, que tienen, las cuales cuentan con mayor número de pistas por sentido con el objetivo de estar preparadas para grandes volúmenes de tráfico. En cambio, la Figura 6b muestra la ciudad de Valparaíso donde los mayores valores de Betweenness centrality se encuentran en algunas vías importantes y los centros de algunos distritos, los cuales corresponden a vías secundarias, vulnerables a congestión vehicular.

La heterogeneidad en la distribución de Betweenness centrality en la red de Valparaíso corresponde al hecho de que la ciudad podría tener un problema de tráfico en comparación con la red de Valencia, donde la Betweenness centrality es homogénea exceptuando las vías preparadas para grandes volúmenes de tráfico.

Figura 6: Betweenness centrality en (a) Valencia y (b) Valparaíso

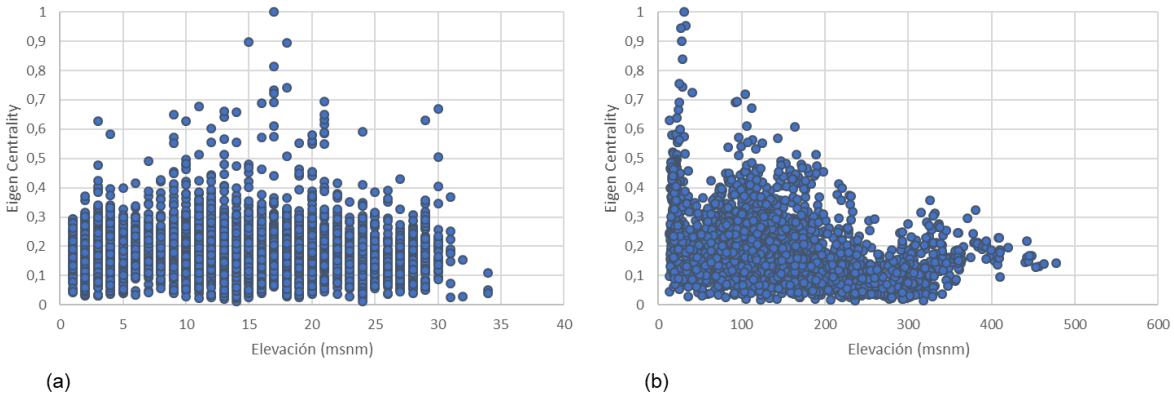
3.3. Efecto de la altura en Valencia y Valparaíso

Los casos de estudio expuestos muestran características geográficas considerablemente diferentes, como lo indica la Figura 7, mientras Valencia posee un perfil predominante homogéneo, con variaciones de elevación desde un metro sobre el nivel del mar hasta 34 metros en las zonas más alejadas al borde costero, Valparaíso presenta una estructura irregular con saltos geográficos desde los 13 metros hasta los 478 metros sobre el nivel del mar en la cumbre de los cerros. Esta diferencia define el desarrollo urbano en la historia de ambas urbes. Las ciudades costeras montañosas vinculan las zonas elevadas a una mayor ocupación demográfica con motivo de las inundaciones a las que se verían afectadas las zonas bajas. Es así como el crecimiento y la conformación de la red urbana se extiende desde las áreas elevadas hacia la zona litoral y quedan delimitadas por las fronteras naturales características de geografías irregulares, como lo son los cerros y sus quebradas, formando comunidades (Andriamamonjisoa & Hubert-Ferrari 2019). Las ciudades emplazadas en superficies regulares permites un crecimiento concéntrico facilitando la formación de redes homogéneas y el estudio para la planificación urbana.

Figura 7: Elevación de (a) Valencia y (b) Valparaíso

Con el objetivo de vincular la elevación en la geografía de las ciudades con la centralidad de los nodos que la componen, se representa Eigen centrality de los nodos que componen la red sobre versus su altura con respecto al nivel del mar.

Figura 8: Eigen centrality v/s elevación para (a) Valencia y (b) Valparaíso



La Figura 8 relaciona Eigen centrality con la elevación de los nodos que componen la red vial de la ciudad. Las intersecciones en Valencia muestran una tendencia a mayores valores de Eigen centrality para los nodos con elevaciones entre los 15 y 20 metros sobre el nivel del mar. Esta característica coincide con los nodos ubicados en la zona central de la ciudad. De esta manera es posible inferir que, para el caso de Valencia, la elevación no afecta en la determinación de la centralidad de la red, ya que los nodos ubicados en el centro mantienen los mayores valores. Para Valparaíso la situación es diferente, ya que los nodos a menor elevación registran los valores mas altos de Eigen centrality mientras a medida que aumenta la altura la centralidad va disminuyendo, estableciendo una proporción inversa para un grupo significativo de nodos. Esto se debe a que la conectividad en las zonas bajas de la ciudad es mayor, mientras que la accesibilidad a las zonas altas periféricas es considerablemente menor.

4. Conclusiones

Una red vial urbana es la columna vertebral de una ciudad, responsable de su funcionamiento, es por lo que un correcto análisis, a través de teoría de grafos, permite hacer un diagnóstico de la situación actual de la conectividad vial de la ciudad. En primer lugar, relacionar la división política-territorial con Modularity Class calculada en función de la red vial urbana, muestra una herramienta que permite orientar la toma de decisiones administrativas para organizar las divisiones de la ciudad en base a las conexiones relativas entre las intersecciones de las calles que conforman la red, formando distritos con alto grado de conectividad, pero que a la vez no estén aisladas de otras comunidades. Luego el estudio de la centralidad de los nodos permite tener una visión general de la red, capaz de forjar un diagnóstico de la situación actual de la ciudad. Por último, al vincular la elevación en la geografía de las ciudades con la centralidad de los nodos que la componen demuestra evidencia cuantitativa sobre el impacto del relieve de una ciudad y como afecta la altura en términos de centralidad en la red. En base a los casos de estudio y su diferencia geográfica es posible establecer, para una ciudad con variaciones de altura, una proporción inversa entre la centralidad y la elevación de un grupo significativo de nodos. Todo este análisis realizado de forma comparativa, entrega información como elemento de entrada para los tomadores de decisión en lo que respecta a la planificación de la ciudad, mostrando la importancia del benchmarking como un mecanismo orientado a establecer conexiones causales entre los diferentes casos de estudio, permitiendo su análisis.

El análisis comparativo de la conectividad vial de las redes urbanas de Valencia y Valparaíso hace posible realizar recomendaciones en cuanto a la planificación urbana y decisiones futuras en las ciudades. Para Valencia, la organización en base a comunidades con alto grado de conexión puede ser un criterio en la organización político-territorial. Por otro lado, Valparaíso debe sortear las dificultades que le impone la geografía mejorando la interacción entre distritos, creando comunidades interconectadas más grandes. En cuanto al desarrollo de la ciudad, Valencia tiene la ventaja de contar con una geografía regular que le permite el crecimiento perimetral, abasteciéndose de grandes vías concéntricas si fuera necesario. En cambio, Valparaíso debe guiar la planificación urbana a la creación de grandes vías capaces de mejorar la gran demanda en la zona central de la ciudad. Es así como entender el crecimiento de la red permite reducir la baja conectividad de algunas zonas.

El presente estudio queda limitado a la caracterización de por su posición geo-referenciada, y el distrito al cual pertenecen, y los arcos por el nombre de la calle, el sentido de la vía y la cantidad de pistas por sentido. Materia de futuras investigaciones son la incorporación de más información a las intersecciones de calles (nodos) y a los tramos de calle que las unen (arcos) pudiendo proporcionar un análisis más completo de la situación actual de la red vial urbana, o también el poder simular situaciones que puedan ser útiles para la planificación urbana. Ejemplo de esto es la incorporación de diferencias que pueden existir entre nodos, siendo que cada intersección de calles proporciona un volumen de tráfico diferente, proporcional al número de registros de vehículos, lo que podría influir en las métricas de centralidad; de igual manera, la consideración de los estándares de los usuarios de la red para elegir el camino más corto, considerando carreteras más rápidas y más convenientes. Adicionalmente la creación de una red vial urbana, como modelo de simulación de la ciudad, permite incorporar información adicional para otros estudios de interés, ya que además de la estructura física, la ciudad también está compuesta por varios tipos de información referentes al funcionamiento de esta, por ejemplo, los tiempos de viaje y personas que transitan en tramos definidos de la red y sus motivos, puntos de interés, tipo de construcción en el área, entre otros, brindando una base para diversos tipos de análisis, completos y dinámico para la planificación urbana de ciudad, facilitando los procesos futuros, técnicos y

políticos, involucrados con el desarrollo y diseño del espacio y el entorno construido de la ciudad.

5. Referencias

Albert, R., & Barabási, A.L. (2002). Statistical Mechanics of Complex Networks. *Reviews of Modern Physics,* 74 (1), 47.

Andriamamonjisoa, S. N., & Hubert-Ferrari, A. (2019). Combining Geology, Geomorphology and Geotechnical Data for a Safer Urbanextension: Application to the Antananarivo Capital City (Madagascar). *Journal of African Earth Sciences*, 151, 417–437. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.12.003.

Biblioteca del Congreso Nacional (2018). Región de Valparaíso. Valparaíso, Chile: Biblioteca del Congreso Nacional

Buhl, J., Gautrais, J., Reeves, N. Solé, R.V., Valverde, S., Kuntz, P., & Theraulaz.G. (2006). Topological Patterns in Street Networks of Self-Organized Urban Settlements. *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems,* 49 (4), 513–522. https://doi.org/10.1140/epjb/e2006-00085-1.

Cardillo, A., Scellato, S., Latora, V., & Porta. S. (2006). Structural Properties of Planar Graphs of Urban Street Patterns. *Physical Review E.*, 73 (6): 066107. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.73.066107.

Chan, S.H.Y., Donner, R.V. & Lämmer. S. (2011). Urban Road Networks – Spatial Networks with Universal Geometric Features ? A Case Study on Germany's Largest Cities. *The European Physical Journal B,* 84 (4), 563–577. https://doi.org/10.1140/epjb/e2011-10889-3.

Cherven, K. (2013). Network graph analysis and visualization with Gephi. England: Packt Publishing.

Cherven, K. (2015). Mastering gephi network visualization. Birmingham, England: Packt Publishing.

Deng, Y., Fu, B., & Sun. C. (2018). Effects of Urban Planning in Guiding Urban Growth: Evidence from Shenzhen, China. *Cities*, 83, 118–128. https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.06.014.

Ingvardson, J.B., & Nielsen. O.A. (2018). How Urban Density, Network Topology and Socio-Economy in Fluence Public Transport Ridership: Empirical Evidence from 48 European Metropolitan Areas. *Journal of Transport Geography*, 72, 50–63. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.07.002.

Instituto Nacional de Estadística (INE) (2018a). Anuario Estadístico de España 2018. Madrid.

Instituto Nacional de Estadística (INE) (2018b). Memoria Censo 2017, Chile. Santiago.

Kong, X., Shi, Y. Yu, S. Liu, J. & Xia. F. (2019). Academic Social Networks: Modeling, Analysis, Mining and Applications. *Journal of Network and Computer Applications*, 132, 86–103. https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.01.029.

Lee, B.H., & Jung. W.S. (2018). Analysis on the Urban Street Network of Korea: Connections between Topology and Meta-Information. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 497, 15–25. https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.12.131.

Leibowicz, B. D. (2018). Policy Recommendations for a Transition to Sustainable Mobility Based on Historical Diffusion Dynamics of Transport Systems. *Energy Policy,* 119, 357–366. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.066.

Ministerio de Fomento (2017). Anualirio Estadístico Del Sistema Portuario de Titularidad Estatal. Madrid: Ministerio de Fomento

Oficina d'Estadística Ajuntament de València (2009). Districte 1. Ciutat Vella. Valencia.

Park, H., & Andrews. C. (2004). "City Planning and Energy Use." In Encyclopedia of Energy, edited by J.V. Cutler, 317–330. Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809665-9.09113-8.

Porta, S., Crucitti, P. & Latora, V. (2006a). The Network Analysis of Urban Streets : A Primal Approach. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 33 (5), 705–725. https://doi.org/10.1068/b32045.

Porta, S., Crucitti, P. & Latora, V. (2006b). The Network Analysis of Urban Streets: A Dual Approach. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 369 (2), 853–866. https://doi.org/10.1016/j.physa.2005.12.063.

Sharifi, A. (2019). Resilient Urban Forms: A Review of Literature on Streets and Street Networks. *Building and Environment*, 147, 171–187. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.040.

Strano, E., Nicosia, V., Latora, V. Porta, S., & Barthélemy, M. (2012). Elementary Processes Governing the Evolution of Road Networks. *Scientific Reports*, 2, 1–8. https://doi.org/10.1038/srep00296.

Tsiotas, D., & Polyzos, S. (2017). The Topology of Urban Road Networks and Its Role to Urban Mobility. *Transportation Research Procedia*, 24, Elsevier: 482–490. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.087.

Wilson, A., Tewdwr-Jones, M., & Comber, R. (2019). Urban Planning, Public Participation and Digital Technology : App Development as a Method of Generating Citizen Involvement in Local Planning Processes. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Sciense,* 46 (2), 286–302. https://doi.org/10.1177/2399808317712515.