

DOI: <http://dx.doi.org/10.30827/cuadgeo.v59i2.9291>MORENO, A. *et al.* (2020). Cuantificación de la vulnerabilidad humana ante la degradación del aire en Madrid
Cuadernos Geográficos 59(2), 149-177

149

Cuantificación de la vulnerabilidad humana ante la degradación del aire en Madrid: un estudio apoyado en geotecnologías

ANTONIO MORENO JIMÉNEZ¹ | MARÍA JESÚS VIDAL DOMÍNGUEZ² |
PEDRO MARTÍNEZ SUÁREZ³

Recibido: 23/04/2019 | Aceptado: 01/07/2019

Resumen

El concepto de vulnerabilidad humana está resultando muy fértil para desvelar dificultades sociales latentes y para inspirar intervenciones proactivas, inherentes a un desarrollo territorial más completo. Dentro de ese campo interdisciplinar este estudio pretende: a) identificar aspectos e indicadores para expresar la vulnerabilidad socio-ambiental, particularmente ante la degradación del aire; y b) construir medidas de la misma idóneas para el ámbito español, usando como caso de estudio la ciudad de Madrid. A tal fin se ha acometido la selección y valoración de facetas e indicadores relevantes mediante la técnica Delphi. Tras una exploración de las relaciones entre dichos indicadores con un análisis de componentes principales, se ha adoptado un promedio ponderado de aquéllos para generar un índice de vulnerabilidad relativa primero y, después, una estimación de la vulnerabilidad absoluta por barrios de la ciudad, que desvelan las notables diferencias internas. Un sistema de información geográfica ha sustentado el tratamiento y análisis espacial de los datos, así como la visualización de los resultados, los cuales ofrecen mejores bases para orientar políticas de protección a los residentes de los barrios más vulnerables de la ciudad.

Palabras clave: vulnerabilidad socio-ambiental; método Delphi; indicadores urbanos; sistemas de información geográfica; Madrid

Abstract

Quantifying human vulnerability to air degradation hazards in Madrid: a geotechnologies-based study

The human vulnerability concept is becoming very fruitful to uncover social latent difficulties and to inspire proactive actions according to a more comprehensive spatial development. Framed on this interdisciplinary field, this study intends: a) to identify aspects and indicators to measure socio-environmental vulnerability, specifically regarding to air degradation; and b) to build measures of it, usable for Spain, and considering the city of Madrid as case study. To these objectives, a set of facets and indicators have been selected and gauged, using the Delphi technique. After exploring the relations among such indicators with principal component analysis, a weighted mean has been adopted to obtain, firstly, a relative vulnerability index, and then an absolute vulnerability estimation for the city neighbourhoods. They uncover noteworthy intra-urban differences. Data handling and spatial analysis, as well as geovisualization of results, have been ef-

1. Departamento de Geografía, Universidad Autónoma de Madrid, España, antonio.moreno@uam.es

2. Departamento de Geografía, Universidad Autónoma de Madrid, España, mariajesus.vidal@uam.es

3. Departamento de Geografía, Universidad Autónoma de Madrid, España, pedromarts@hotmail.com

fectively supported by a geographical information system. The findings deliver better knowledge to implement policies for protecting people living in the most vulnerable areas of the city.

Keywords: socio-environmental vulnerability; Delphi method; urban indicators; geographical information systems; Madrid

1. Introducción

En las sociedades avanzadas actuales, junto con principios como la competitividad, otros como los de cohesión, solidaridad, defensa y protección a ciudadanos frágiles o con limitaciones, establecen el necesario contrapunto reclamado por la diversidad del género humano en capacidades, recursos y situaciones. Ellos están catalizando una pujante corriente de trabajo científico y aplicado centrada en identificar rasgos personales y aspectos contextuales que ocasionan situaciones de debilidad o flaqueza para poder desarrollar una vida conforme a los estándares “normales”. El foco central de esa corriente se ha puesto en la idea de vulnerabilidad, por su adecuación para valorar situaciones individuales o colectivas donde ella alcanza diferentes grados, desde leves a severos o preocupantes.

El tema se ha convertido en un terreno interdisciplinar donde aumentan los estudios de forma significativa, pero también en una preocupación social y política, instancias desde las cuales se reivindica la intervención pública para paliar esa vulnerabilidad y empoderar a los ciudadanos de cara a una implicación activa en la resolución de ese tipo de problemas.

Buena parte de los estudios se ha ido adentrando en la labor de evaluar la vulnerabilidad, como vía de aportar conocimiento, es decir, diagnósticos y eventualmente propuestas para la acción (Birkmann, 2006a; Cutter y Corendea, 2013). En esa dirección, y desde la Geografía, las aportaciones están enfatizando la visión espacial (*e. g.* Coy, 2010; D’Ercole y Metzger, 2009; Palacios *et al.*, 2018), lo que implica contemplar aspectos, actores y dinámicas, referidos siempre a una localización, por resultar crucial para caracterizar primero el problema y remediarlo después.

La polivalencia del concepto ha ido propiciando una paulatina profundización y una ramificación del mismo, para abordar subproblemas de vulnerabilidad cada vez más específicos, según se verá más adelante. Ello ha conducido a una diversidad de enfoques y propuestas metodológicas, acordes con la particular delimitación del asunto que se realice. Siguiendo esa línea de trabajo, este estudio prioriza una visión espacial de la vulnerabilidad humana ante posibles adversidades ambientales, singularmente por exposición a baja calidad del aire y en el medio urbano español. Ambas acotaciones resultan pertinentes y significativas por cuanto ese problema ambiental es bien conocido y sufrido en las ciudades, y en la Unión Europea existe una sensibilización y capacidad de intervención que hacen verosímil la aplicación práctica de los resultados de este tipo de indagaciones.

En el apartado siguiente se revisarán las contribuciones más significativas para contextualizar nuestra indagación, y a continuación se presentarán las cuestiones y decisiones metodológicas fundamentales; luego se analizarán los resultados y se terminará con una discusión de los mismos y unas breves conclusiones.

2. Antecedentes conceptuales y metodológicos

Al igual que otros conceptos, la vulnerabilidad ha sido objeto de interés por parte de especialistas procedentes de diversas disciplinas, por lo que definirla de forma simple no resulta fácil. Así se constata en varias de las revisiones del tema (*vid.* Brooks, 2003; Cardona, 2003; Adger, 2006; Birkmann, 2006a; Sánchez y Egea, 2011; Lampis, 2013), en las que según el ángulo de visión se suelen señalar elementos y matices diferenciados, a la vez que relevantes (Egea *et al.*, 2012). Quizá en lo que sí puede hallarse consenso es en conferirle un carácter polifacético, porque requiere aglutinar aspectos heterogéneos a la hora de formular versiones operativas del mismo, dinámico (Schneiderbauer *et al.*, 2017) y también polivalente, por su aplicabilidad a problemas muy diversos (Alguacil *et al.*, 2014; Quenault, 2015).

En un sentido general la idea de vulnerabilidad evoca ciertos componentes básicos: a) quién o qué es vulnerable, y por tanto es susceptible de ser impactado; b) ante qué amenazas, afecciones o agentes puede resultar débil o frágil; y c) bajo qué formas, cualidades, intensidades, duraciones, etc. se manifiesta esa vulnerabilidad. Bajo un prisma tan amplio, no extraña que el concepto sea relevante para entes muy diversos: personas y otros animales, plantas, objetos, organizaciones y comunidades, lugares, paisajes y espacios (marinos, aéreos, ...), etc.

En el ámbito de las ciencias sociales y del territorio el concepto ha ido cobrando una patente notoriedad, configurando líneas de indagación muy dinámicas y, desde la Geografía, como intersección de aquéllas, la atención va a la par (*vid.* Palacios *et al.*, 2018). Nuestro trabajo sitúa el foco en esa parcela tan geográfica que surge de la interfaz sociedad y medio ambiente, y concretamente en la subparcela que se preocupa por la vulnerabilidad humana ante ciertos peligros o rigores provenientes del entorno ambiental.

Eludiendo una revisión amplia del concepto, procede mencionar algunos de los elementos definitorios más notables de la vulnerabilidad humana, según la bibliografía, que interesa a nuestros fines. Al respecto se constata bastante consenso en aludir a la susceptibilidad (biológica, económica, política o social) o potencialidad de la población de verse afectada por algún fenómeno o agente externo, estresante o desestabilizador, de origen natural o antrópico (Cardona, 2003). Bastantes autores (*e. g.* Dwyer *et al.*, 2004; Birkmann, 2006a; Eakin y Luers, 2006; Wisner *et al.*, 2006; Frazier *et al.*, 2014) concuerdan en un entendimiento que integra ciertos componentes o subconceptos principales: 1) la sensibilidad de los sujetos o entes potencialmente afectables, que expresaría su fragilidad o debilidad (*vs.* fortaleza) ante agresiones o estímulos; 2) la desigual exposición de dichos entes a los fenómenos o agentes amenazantes, lo que supone, entre otras cosas, una delimitación contextual o concreción de sus circunstancias espacio-temporales; y 3) la resiliencia, la cual posee significados algo variados por haber sido objeto de definición por especialistas de disciplinas diversas (*e. g.* Reghezza *et al.*, 2012; Masterson *et al.*, 2014, pp. 25-30). En muchas de ellas hay elementos comunes: la capacidad (de un sistema o comunidad) de resistir y absorber cambios e impactos y, por tanto, de mantenerse; la posibilidad de recuperarse con prontitud tras un shock; también se suele añadir la potencialidad de reducir vulnerabilidades futuras mediante estrategias adaptativas. Junto con la implicación ciudadana, la resiliencia humana dependería de la capacidad de una comunidad de acceder y usar, para esos fines de sostenibilidad, varios tipos de capital (activos o *assets*): social, económico, físico y humano (*vid.* Morrone *et al.*, 2011; Masterson *et al.*, 2014, pp. 36-38). Esos tres componentes suelen contemplarse a la hora de analizar y medir la vulnerabilidad en trabajos de corte más metodológico (por ejemplo en los índices propuestos por Frazier *et al.*, 2014 o Weber *et al.*, 2015).

Una mirada amplia a los abundantes estudios intentando medir la vulnerabilidad constata una variedad de interpretaciones de la misma, articuladas en torno a dos vectores señalados antes: quiénes son los sujetos vulnerables y cuáles son los fenómenos amenazantes que les pueden afectar. A partir de ellos el interés del estudioso y sus objetivos aplicados han desembocado en aproximaciones diferenciadas y en las consecuentes decisiones metodológicas.

En una revisión sucinta y selectiva de los antecedentes relevantes, se pueden identificar:

- Vulnerabilidad referida a la población general, contemplando facetas diversas (como recogen Masterson *et al.*, 2014, pp. 97-112), con variantes especializadas que privilegian bien la dimensión económica (*e. g.* Coy, 2010), por cuanto atenta a los ingresos bajos o irregulares, bien la sociodemográfica (*e. g.* Sánchez y Egea, 2011), que prioriza ciertos problemas de la población (por razón de edad, sexo, familia, etc.), o bien la específicamente social (*e. g.* Lafuente y Faura, 2012; Bello, 2013; Sánchez, 2009), en la que priman las consideraciones sobre la exclusión, dependencia, marginalidad, etc.
- Junto a la aproximación sustentada en variables estadísticas “objetivas” merece la pena subrayar la que tiene en cuenta también, o privilegia, la visión personal de las amenazas, vulnerabilidad subjetiva (*e. g.* Couch y Coles, 2011; Thomas, 2013; Moreno y Fuenzalida, 2017), por cuanto realza los mecanismos psicológicos que, como tamiz, desembocan en vivencias, actitudes y conductas muy significativas social, política y espacialmente.
- Vulnerabilidad espacial, bien relativa a atributos geográficos de los lugares y a su protección (Guezo y Verrhiest, 2006; D’Ercole y Metzger, 2009; Domínguez *et al.*, 2009; Ruiz, 2012; Holland *et al.*, 2011), bien alusiva a diversas facetas de la vulnerabilidad urbana (sociodemográfica, económica, gobernabilidad, hábitat) como hacen Subirats y Martí-Costa (2014), o sus barrios, poniendo el acento en usos del suelo como el residencial, los problemas de la vivienda, sus habitantes y su entorno (Egea *et al.*, 2008; Alguacil, 2006; Alguacil *et al.*, 2014; Ayuntamiento de Madrid, 2018).
- Una aproximación que integra las dos variantes antedichas, es decir combinando el componente poblacional y las características del lugar de residencia, es la que desarrollan Lo *et al.* (2015) en el estudio sobre la región de York (Canadá). En él examinan la vulnerabilidad de ciertos grupos demográficos sensibles (ancianos, inmigrantes y personas de bajas rentas) respecto a la dotación de las que denominan “infraestructuras sociales” (servicios de educación, empleo, vivienda y de acogida) por zonas.
- Eventualmente, algunos autores han considerado específicamente la vulnerabilidad de actividades y usos del suelo urbanos, tales como la edificación e infraestructuras (Santos *et al.*, 2104), pero también rurales como la agricultura (Berry *et al.*, 2006).

La fuerte sensibilidad social y política hacia el medio ambiente explica que la vulnerabilidad originada por factores o problemas ambientales haya sido tratada en numerosos estudios:

- En algunos casos se han contemplado las múltiples amenazas ambientales, y eventualmente tecnológicas, que se ciernen sobre un lugar, como por ejemplo hicieron Cutter *et al.* (2000) para el Georgetown County (South Carolina) o Collins *et al.* (2009) para la conurbación El Paso-Ciudad Juárez. En ocasiones se han considerado territorios a escala regional, como hacen Tran *et al.* (2010) en su ensayo de medir la vulnerabilidad ambiental general por cuencas hidrográficas en una región de los EE.UU. En esa misma línea pueden inscribirse trabajos que avistan a múltiples amenazas de origen natural (Thomas, 2013) o geomorfológico (Kappes *et al.*, 2012).

- Con bastante frecuencia el foco se ha puesto sobre amenazas ambientales específicas, entre las cuales cabe mencionar: el clima en general (Cutter *et al.*, 2009; Malcomb *et al.*, 2014), los efectos del cambio climático (Bertoux y González, 2015; Pandey y Bardsley, 2015; Wesenbeck *et al.*, 2016; Mainali y Pricope, 2017), las inundaciones (Frazier *et al.*, 2014; Hung *et al.*, 2016; Sánchez y Chávez, 2016; Rakotoarisoa *et al.*, 2018), los ciclones (Uitto, 1998), los tsunamis (Santos *et al.*, 2014), los sismos (Armas *et al.*, 2016; Frigerio *et al.*, 2016), etc.

Esta última serie de trabajos atestigua la progresiva tendencia, ya señalada antes, a adoptar el concepto de vulnerabilidad para profundizar en la interacción entre sociedad y ambiente de manera selectiva, esto es, ahondando en cómo amenazas ambientales concretas pueden afectar a grupos de población también específicos y en función de los rasgos que éstos poseen. Se trata, pues, de iluminar las fragilidades singulares que ciertas categorías de individuos tienen, en virtud de sus atributos y circunstancias (que motivadamente se entienden como reductoras de la fortaleza y defensa humanas), frente a peligros o agresiones ambientales bien definidos.

Consta ya un cierto número de sugerentes aportaciones que están explorando esa línea de desarrollo. El ya citado Uitto (1998), por ejemplo, estudió la vulnerabilidad de los “sin techo” en Tokio frente a los ciclones, Greenberg (2015) ha considerado la vulnerabilidad y protección de los mayores frente a desastres naturales, mientras que Sánchez y Chávez (2016) han analizado la vulnerabilidad de los ancianos respecto a episodios de inundaciones.

Algunos otros han acotado singularmente la amenaza, pero han considerado a los entes vulnerables de forma más genérica mediante indicadores varios. Un ejemplo de ello es el trabajo de Johnson *et al.* (2012) quienes han desarrollado y testado un índice de vulnerabilidad social específico frente a olas de calor extremo en la ciudad de Chicago. A tal fin identificaron un conjunto de variables demográficas, socioeconómicas, de uso del suelo y temperatura de la superficie urbana por manzana censal (*census block*), las cuales, tras una selección (19 variables) y reducción a cuatro componentes principales (*circa* 79 % de la varianza), se combinaron en un índice compuesto de vulnerabilidad a calor extremo (EHVI), cuya validación fue testada frente a datos (tasa) de mortalidad durante una ola de calor. Evidenciaron así una tendencia bastante congruente con la previsión: proporcionalmente más óbitos en las zonas de alto índice y menos en las de bajo índice. El trabajo de Weber *et al.* (2015) también se centra en las olas de calor extremo (sobre la ciudad de Filadelfia), aunque como variables de sensibilidad incluye los ancianos residiendo solos, las viviendas antiguas y la población sin grado de educación secundaria.

El enfoque de nuestro trabajo se inserta en este frente de la tradición investigadora, por cuanto avista a proponer un selecto conjunto de aspectos que se reconocen como asociados y expresivos de la vulnerabilidad humana al aire degradado que respiramos. El planteamiento adoptado se centra en determinar indicadores estadísticos relativos a las debilidades o sensibilidad humanas, la exposición y la capacidad de respuesta y de recuperación, de tal suerte que confluyan en unas medidas sintéticas imputables a la población de cada zona. Ésta por tanto detentaría, en general, un grado de susceptibilidad o fragilidad acorde con el valor relativo condensado en un índice.

Procede añadir, de acuerdo con la posición explícita o implícitamente manifestada en varios trabajos (*e. g.* Holand y Lujala, 2013; Alguacil *et al.*, 2014; Lixin *et al.*, 2014), que la evaluación de la vulnerabilidad humana demanda un tratamiento geográficamente contextualizado por dos mo-

tivos: primero, porque ciertos componentes de la misma (sensibilidad o resiliencia por ejemplo, y sus determinantes) se pueden sustanciar de forma muy distinta según los lugares (*e. g.* países o continentes); y segundo, porque la percepción y conducta humanas ante las amenazas también difieren espacialmente. Bajo tal premisa, nuestro análisis asume un marco espacio-temporal acotado, ilustrativo de la realidad urbana española y, en parte, europea. Ello inspirará ciertas decisiones metodológicas que más adelante se explicitarán.

Junto a esa serie de estudios, de carácter fundamentalmente metodológico-empírico, y que desvelan la multiplicidad de variantes formuladas para estudiar la vulnerabilidad humana o de sus asentamientos, conviene recordar una cuestión crucial que Tate (2013) ha recalcado: las incertidumbres sobre los indicadores utilizados para medir y representar el concepto de vulnerabilidad. El asunto se ha tratado al menos de varias formas: a) mediante consultas a expertos con técnicas Delphi (*e. g.* Emrich, 2005) o evaluación multicriterio (Ayuntamiento de Madrid, 2018), a grupos involucrados en evaluación multicriterio (Yáñez y Muñoz, 2017) o con encuestas a afectados (*e. g.* Johnson *et al.*, 2012; Chávez y Sánchez, 2016; Sánchez y Chávez, 2016); y b) mediante la comprobación de si tales instrumentos estadísticos, expresivos de los condicionantes de los impactos, correlacionan con los efectos negativos sobre los entes vulnerables. Al respecto son notorios los estudios sobre la incidencia de la polución del aire en las personas (*vid.* Deguen y Zmirou-Navier, 2010), o las relaciones estadísticas entre niveles de mortalidad, alta polución y presencia de ciertos grupos sociodemográficos desfavorecidos o vulnerables en Madrid (*vid.* Prieto *et al.* 2017 y 2018). En nuestro estudio se adoptará la técnica Delphi para solventar ese paso, según se explicará más adelante.

Los objetivos contemplados en esta investigación son dos: en primer lugar, se persigue identificar y establecer facetas, circunstancias y rasgos relevantes de la población y del medio urbano que puedan incidir en la vulnerabilidad social hacia una categoría de peligros ambientales, los inherentes a la calidad del aire; a tal fin se asume que habrán de concernir a los componentes de sensibilidad, exposición y resiliencia enunciados antes. Y en segundo lugar, se pretende abordar una medición operativa de dicha vulnerabilidad, apta para su aplicación en ciudades del ámbito español. Ello implicará: a) un estudio preliminar de las relaciones estadísticas entre los indicadores; y b) el diseño y construcción de un índice para expresar la vulnerabilidad relativa entre zonas de la ciudad, según los atributos coadyuvantes de aquélla, y una medida de la vulnerabilidad absoluta, expresiva de la necesidad de protección en cada zona y que considere no solo esa vulnerabilidad relativa, sino la magnitud de la población residente a la que le es imputable. Con ello se aspira, en última instancia, a avanzar en el conocimiento y los instrumentos (basados en geotecnologías) para implementar acciones atentas a las desigualdades en esa vulnerabilidad en el espacio intraurbano.

3. El caso de estudio y las fuentes de datos estadísticos y cartográficos

3.1. El ámbito de estudio

El municipio de estudio, Madrid, es el más poblado de España con 3 182 175 habitantes (1 de enero de 2017), posee una extensión de 604,3 km² y está dividido administrativamente en 21 distritos y 128 barrios (figura 1). Como la mayoría de las ciudades españolas, el espacio urbano madrileño se caracteriza por una notable compacidad y densidad de población.

Figura 1. Ámbito de estudio: área urbana poblada (AUP) de la ciudad de Madrid, distritos y barrios (tras una agregación parcial), 2015



Fuente: elaboración propia a partir de cartografía oficial del Instituto Geográfico Nacional, de la Comunidad de Madrid y del Ayuntamiento de Madrid (véase apdo. 3.1).

Dado que el foco recae en la población residente y que ésta se distribuye espacial y temporalmente de manera desigual y variable en el espacio municipal y urbano, se ha delimitado un ámbito más relevante, ya usado en otros trabajos, denominado como “área urbana poblada” (AUP) (figura 1). Se entiende como tal aquellas zonas de la ciudad de uso residencial o en las que, por su cercanía a éste, la población realiza su vida cotidiana. La delimitación operativa del AUP se ha llevado a cabo con referencia al año 2015 y ha seguido un proceso laborioso de identificación y selección de zonas urbanas, excluyendo los espacios más extensos del municipio dedicados a usos industriales, grandes infraestructuras y equipamientos, transportes, agrícolas, ganaderos, forestales, baldíos, etc., donde la densidad de población es baja (diseminada) o nula. A tal fin se ha recurrido al examen de una serie de fuentes cartográficas digitales y ortoimágenes del Instituto Geográfico Nacional: Base Topográfica Nacional (BTN100, 2015; BTN25, 2016), Base Cartográfica Nacional (BCN200, 2011), Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España (SIOSE, 2011), Mapa de Ocupación del Suelo en España (*Corine Land Cover*), ortofotos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA, 2014 y 2015); así como de la Comunidad y del Ayuntamiento de Madrid (2015). El AUP estrictamente ocupa, según nuestros cálculos, 182,04 km² (30,1 % de la superficie municipal) y tendría una densidad de población de 174,81 hab./ha.

3.2. Las unidades espaciales de análisis

El objetivo de medir la vulnerabilidad socio-ambiental (VSA) en las distintas partes de la ciudad requiere disponer de datos por unidades espaciales convenientes, cuestión que supone un reto de cierto calado. La decisión de qué partición adoptar plantea un *trade off* entre adecuación y viabilidad, que en última instancia se ha de solventar con realismo pragmático. Como es bien sabido, la cantidad y calidad de los datos disponibles está, en general, en relación inversa con la desagregación espacial, de suerte que para unidades pequeñas la escasez puede resultar tan limitante que impida el estudio. Tras considerar unidades reducidas como las secciones censales, éstas hubieron ser descartadas debido a la exigua información existente en los distintos organismos estadísticos públicos a ese nivel de detalle. Frente a los excesivamente grandes distritos municipales, se evaluó como alternativa intermedia la división en barrios cuya cifra, 128, posibilita una razonable desagregación intraurbana.

La obtención y examen para nuestros fines de la información de los Censos de Población y Vivienda de 2011 del Instituto Nacional de Estadística (INE) suscitó una situación harto compleja que se puede resumir así:

- Las operaciones censales fueron realizadas mediante procedimientos muestrales.
- El muestreo implicaba unos requisitos mínimos de unidades muestrales en cada fracción espacial, que variaban según el atributo de interés, para superar el umbral del secreto y de estimación estadísticos. Esos mínimos oscilaban entre 80 y 210 personas, según los casos.
- La obtención de los datos había de canalizarse a través de una plataforma web, el Sistema de Difusión Estadística del INE, aparentemente muy flexible, pero con un protocolo operativo muy laborioso para realizar una consulta y explotación algo amplia.

En resumen, tras evaluar las posibilidades y su coste se decidió:

1. Adoptar como partición intraurbana los barrios municipales, a efectos de realizar los análisis, aunque algunos, por su pequeña población, habrían de agregarse.
2. Ante los obstáculos derivados de los requisitos de unidades muestrales que limitasen la obtención de las variables de interés se procedió, primero, a identificar los barrios problemáticos y, segundo, a realizar fusiones de los mismos con otros.
3. Tal agregación de barrios se llevó a cabo según los siguientes criterios: minimización de las fusiones, agregación con barrios adyacentes espacialmente, mantenimiento de la consistencia jerárquica con las divisiones de distritos y similitud de la composición sociodemográfica y estructura urbanística con los barrios vecinos.

Finalmente, la partición del ámbito estricto de estudio se conformó: a) mediante la agregación de unos pocos barrios (9), resultando un total de 119 unidades estadísticas espaciales; b) ajustando el espacio analizado al ámbito dentro del AUP, que será el manejado y mostrado cartográficamente. Computacionalmente estas operaciones fueron realizadas con SIG. La figura 1 muestra la partición y extensión del AUP con los barrios agregados.

Las capas de divisiones municipales en distritos y barrios fueron obtenidas del Ayuntamiento de Madrid (Subdirección General de Estadística), a fecha de 24 de junio de 2015.

4. Determinación operativa de facetas e indicadores de la VSA

4.1. Aplicación y resultados del método Delphi

Uno de nuestros objetivos principales ha sido identificar un conjunto de dimensiones o aspectos relevantes por su incidencia en la VSA y establecer su importancia relativa, para lo cual se ha recurrido a la conocida técnica Delphi, que cuenta con antecedentes avaladores (*vid.* Emrich, 2005; Greiving *et al.*, 2006). Dos fases se han desarrollado a tal fin:

- a. Una consulta a la bibliografía para preseleccionar factores de vulnerabilidad recogidos en las revisiones sobre el tema (*vid.* apartado de Antecedentes conceptuales), en obras como las de Birkmann (2006b) y Masterson *et al.* (2014, pp. 100-104) y en los propios estudios de caso (*e. g.* Cutter *et al.*, 2003; Dwyer *et al.*, 2004; Frazier *et al.*, 2014). Como resultado, se obtuvo un amplio conjunto de aspectos con los cuales, y a la vista de las fuentes estadísticas disponibles, se concretó una relación preliminar de circunstancias y variables que suelen aducirse como condicionantes de la vulnerabilidad de la población a amenazas ambientales (particularmente la calidad del aire). Básicamente aludían a instrucción, edad, situación familiar, invalidez, situación laboral y ocupación, renta per cápita, inmigración procedente de países menos desarrollados, baja calidad de la vivienda, y disponibilidad / accesibilidad espacial a centros de atención social y de salud públicos. Algún otro aspecto obvio y relevante, como la morbilidad respiratoria, no pudo ser contemplado por la carencia de datos adecuadamente georreferenciados.
- b. Una consulta a un panel de expertos mediante la técnica Delphi.

Ante las incertidumbres de establecer la incidencia de esos factores en la VSA y su importancia relativa se recurrió al método Delphi el cual, como es conocido, avista la obtención de información mediante la consulta a expertos de un área, con el fin de recabar la opinión de consenso del grupo (*e. g.* Linstone y Turoff, 1975; Reguant y Torrado, 2016). Se trata de una técnica bastante efectiva para estructurar un proceso de comunicación grupal en la que se selecciona primero un conjunto de expertos a los que se pregunta su opinión sobre las cuestiones a decidir. Ello se repite en sucesivas rondas anónimas, al objeto de conseguir consenso, reduciendo la variabilidad en las contestaciones.

En nuestro caso el experto debía valorar en una escala ordinal de 1 (mínimo) a 5 (máximo) el grado de incidencia que una serie de aspectos pueden tener sobre la VSA en el contexto urbano español y, opcionalmente, motivar su parecer. Se podían añadir también nuevos factores o consideraciones.

Se estableció y seleccionó una cifra de 10 expertos (acorde con otros estudios) en Geografía social, de la población y urbana española, procedentes de diversas instituciones científicas: la mayoría eran profesores universitarios españoles y 1 latinoamericano (aunque conocedor de la realidad española); 3 pertenecían a centros especializados de investigación.

Se realizaron dos rondas de consultas por correo electrónico, contestando 9 en la primera ronda. En la segunda, la encuesta incluía el promedio de las valoraciones de cada aspecto y su variabilidad (desviación estándar) de la primera ronda, junto con la respuesta personal dada en la misma; se permitía modificar la valoración inicial, si lo consideraba necesario, y motivarla. De esta segunda ronda se obtuvieron 5 respuestas que, en general, arrojaron resultados más afinados y convergentes. La tabla 1 recoge la síntesis final de los mismos.

Tabla 1. Estadísticos de las respuestas finales a la consulta Delphi sobre aspectos e importancia de los mismos en la VSA

Aspecto	Importancia				
	Media	Desv. típica (DT)	Coef. de variación (CV)	Valor máx.	Valor mín.
Inmigrantes de países menos desarrollados (Europa del E, América Latina, Asia, África)	3,67	0,47	12,86	4	3
Personas mayores en hogares solos / sin pareja	4,22	0,63	14,89	5	3
Personas adultas y mayores con bajo nivel de instrucción	3,67	1,15	31,49	5	1
Residentes en viviendas de alquiler	2,00	1,25	62,36	4	1
Residentes en viviendas pequeñas	1,78	0,92	51,54	3	1
Residentes en hogares unipersonales	2,67	1,25	46,77	5	1
Residentes en hogares con 6 miembros o más	2,44	1,50	61,32	5	1
Residentes en situación de paro	4,00	0,94	23,57	5	3
Residentes con invalidez	4,56	0,68	15,04	5	3
Situación de jubilado, prejubilado o pensionista	3,11	0,87	28,12	5	2
Empleo eventual o temporal	3,00	0,82	27,22	4	2
Empleo en industria manufacturera o construcción / Operadores de instalaciones y maquinaria / Ocupaciones elementales	2,89	0,99	34,40	5	2
Renta per cápita	4,22	0,63	14,89	5	3
Viviendas sin calefacción	4,00	0,67	16,67	5	3
Viviendas sin internet	2,39	1,05	43,88	4	1
Viviendas sin ascensor (> 4ª planta)	3,56	1,07	29,97	5	1
Viviendas en edificio en mal estado	4,00	0,94	23,57	5	2
Viviendas sin instalaciones de accesibilidad	3,67	1,15	31,49	5	1
Residentes lejanos a centros de salud públicos	3,67	0,67	18,18	5	3
Residentes lejanos a centros municipales de servicios sociales	3,11	0,99	31,94	4	1
Personas de edad avanzada (> 80 años) y niños (< 4 años)	4,40	0,49	11,13	5	4

Fuente: elaboración propia.

El examen de la tabla denota opiniones sustanciosas de los expertos y de distinto tenor: ciertos aspectos contaron con bastante aval; otros recibieron una apreciación sobre su idoneidad menos favorable, bien con cierto consenso sobre su escasa o nula pertinencia, bien con pareceres algo contradictorios: el régimen de tenencia de vivienda en alquiler, las viviendas pequeñas, los hogares unipersonales, los hogares con 6 miembros o más y la situación de jubilado, prejubilado o pensionista, todas ellas fueron descartadas para el estudio.

Tras analizar las contestaciones y las sugerencias recibidas pareció justificado: a) Mantener como pertinentes la mayor parte de los aspectos previstos al principio, tras haber añadido alguno en la segunda ronda. b) Excluir otros por discutibles, poco adecuados o redundantes para medir la VSA (*vid. infra*). c) Colegir una relación de facetas e indicadores convenientes para expresar la VSA en el ámbito de estudio y deducir unas ponderaciones para los mismos, como se detallará más adelante.

4.2. Facetas relevantes seleccionadas para la VSA

A partir de los hallazgos de la consulta Delphi se procedió a una agrupación coherente de los aspectos contemplados para conformar un total de 9 facetas contribuyentes a la VSA, cuyo enunciado y motivación sucinta se muestra en la tabla 2, junto con el componente de la vulnerabilidad que involucran.

Tabla 2. Facetas contempladas como condicionantes de la vulnerabilidad socio-ambiental

Acrónimo	Faceta	Motivación de la forma de incidencia	Componente (*)
EDU	Instrucción	La carencia o bajo nivel educativo coarta las capacidades para la autoprotección y el cuidado personal, así como para conocer y aprovechar eficazmente los diversos recursos defensivos (e. g. equipamientos, servicios, información) existentes en el lugar o comunidad de residencia. Es un componente básico del estatus socioeconómico (ESE).	S, R
EDA	Edad	Es bien sabido que ciertos periodos de la vida humana, como la infancia y la vejez, conllevan menores defensas biológicas o un deterioro fisiológico y, por tanto, una fragilidad mayor ante una atmósfera de baja calidad. Ello suele vincularse a morbilidad y mortalidad específicas (e. g. respiratorias y cardiovasculares) más frecuentes y severas en tales grupos etarios.	S, R
INM	Inmigración desde países menos desarrollados	La inmigración, especialmente la internacional, suele alterar las condiciones y recursos para la preservación individual respecto al lugar de origen, sobre todo si la "distancia" cultural, económica, social, etc. con la comunidad de destino es grande. Ello es patente entre los inmigrantes de países menos desarrollados, los cuales, junto a las dificultades de integración, se ven abocados a trabajos de menor calidad y seguridad (incluso con desvalimiento legal), lo que también suele exponerles a condiciones ambientales y atmosféricas deficientes, penosas o peligrosas.	S, E, R
FAM	Situación familiar / estado civil	Ciertas categorías de estado civil o formas de convivencia que propenden al individualismo y a hogares unipersonales, hacen gravitar sobre la persona aislada una mayor responsabilidad de las funciones de "reproducción" o sostenibilidad vital. Esa merma del soporte socio-familiar inmediato puede desencadenar, sobre todo en ciertos tramos de edad (la ancianidad), flaquezas diversas y más serias cuando se asocian a otras adversidades (bio-fisiológicas, económicas, educativas, etc.).	R
INV	Invalidez / discapacidad	Algunas personas, y por causas diferentes, poseen facultades físicas o mentales reducidas, en grado diverso, respecto a los rasgos modales en una sociedad. Aunque el tipo de limitación condicionará de forma desigual la eventual dependencia, cabe asumir que, de forma general, ello puede conllevar una superior fragilidad y/o menor resiliencia ante amenazas ambientales.	S, R
LAB	Situación laboral y ocupación	El desempleo (como factor de exclusión social y económica) y la profesión ejercida condicionan muchas de las capacidades de realización y estabilidad personal, implicando debilidades o robusteces en bastantes frentes vitales. Ciertos tipos de ocupaciones se realizan, en gran medida, al aire libre o en ambientes de calidad atmosférica mediocre o baja, exponiendo al trabajador a condiciones más adversas. La profesión, además, es una faceta destacada en el ESE.	S, E
RPC	Renta per cápita	Aunque de carácter económico, este factor constituye un notable sintetizador de muchos rasgos personales y comportamentales, determinando por ese motivo las potencialidades generales de cara a la protección y resiliencia humanas. La segregación intraurbana puede implicar exposiciones a calidad del aire muy desiguales. Es otro componente esencial del ESE.	S, E, R
VIV	Falta de calidad de la vivienda	La vivienda constituye un caparazón social y espacial primario de cara al mantenimiento y desarrollo vital, por lo que sus atributos (estado, tamaño, instalaciones, dotaciones, etc.) determinan la fortaleza / vulnerabilidad de sus moradores en general y respecto al ambiente en particular. Es otro componente básico del ESE.	S, E
SAL	Accesibilidad espacial a centros de atención social y de salud públicos	La disponibilidad de estos servicios proporciona apoyo a los ciudadanos ante problemas de naturaleza social o bio-fisiológica, reforzando o limitando su capacidad para superarlos y, por ende, su resiliencia. Es bien sabido que su uso, y por consiguiente su efectividad, están condicionados por la accesibilidad espacial que ofrecen.	R

* S = sensibilidad, E = exposición, R = resiliencia. Fuente: elaboración propia.

4.3. Los indicadores estadísticos y las fuentes de datos

Para la transcripción operativa de las facetas recién descritas se había preseleccionado un amplio conjunto de indicadores (50 inicialmente) con estos criterios: a) La conveniencia de contar con varios indicadores por cada faceta, por completitud. b) La eventualidad de que algunos indicadores expresasen varias facetas, congruente con el carácter multidimensional que la VSA posee. c) La posibilidad de escoger los indicadores más adecuados y refinados, cuando se disponía de versiones ligeramente distintas. d) La existencia de fuentes de datos compatibles espacial y temporalmente.

Tras una labor de discusión, teniendo en cuenta los hallazgos del proceso Delphi y varias fases de depuración (realizando ensayos estadísticos exploratorios), se eligió un total de 27 indicadores. En la tabla 3 se muestran el acrónimo adoptado en los tratamientos analíticos, la expresión de su cálculo y las facetas de la VSA con las que se vincula (una principal y, en determinados casos, otra secundaria).

En cuanto a las fuentes de datos, casi todos los indicadores de VSA de la tabla 3 proceden de los Censos de Población y Vivienda de 2011 del Instituto Nacional de Estadística (INE). La descarga de datos a través de la plataforma web del INE se debió realizar por secciones censales, para luego totalizarlos para las 119 unidades (barrios con las agregaciones).

Un segundo proveedor de información ha sido el Ayuntamiento de Madrid (Subdirección General de Estadística) a través de su página web. Se descargó la población total, los efectivos por grupos de edad y el número de hogares con personas que viven solas (a 1 de enero de 2012), todos ellos procedentes del Padrón Municipal de Habitantes. De la misma fuente se ha obtenido la población total (a 1 de enero de 2013 y 1 de enero de 2014), así como la población por edificio (a 1 de enero de 2015). Del mismo organismo proviene la renta disponible bruta per cápita (referida a 2013). Para las agrupaciones de barrios se hubo de recalcular dicho valor mediante la media ponderada por la población total de cada barrio (a 1 de enero de 2014).

Los centros de salud públicos (fechados en abril de 2016) y consultorios de salud (datados en mayo de 2016) se descargaron como capas cartográficas de puntos desde la web del Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid (IECM). Los centros de especialidades públicas (datados en mayo de 2015) provienen de la Consejería de Sanidad de la Comunidad de Madrid, y se descargaron de la web del IECM.

Los centros de servicios sociales municipales (de octubre de 2014) se obtuvieron del Portal de Datos Abiertos del Ayuntamiento de Madrid, en formato csv, que fue convertido a capa cartográfica de puntos para su uso con SIG.

Tabla 3. Indicadores estadísticos elegidos y facetas concernidas de la VSA

Acrónimo	Indicador	Faceta principal implicada (y secundaria)
PcP1664_BI	Población entre 16 y 64 años (ambos incluidos) analfabeta, sin estudios o estudios de primer grado * 100 / Población entre 16 y 64 años (ambos incluidos)	EDU (EDA)
PcP65m_BI	Población de 65 y más años analfabeta, sin estudios o estudios de primer grado * 100 / Población de 65 y más años	EDU (EDA)
PcP03	Población entre 0 y 3 años (ambos incluidos) * 100 / Población total (01/01/2012)	EDA
PcP65m	Población de 65 y más años * 100 / Población total	EDA
PcP80m	Población de 80 y más años * 100 / Población total (01/01/2012)	EDA
PcP_NoUE	Población nacida en un país europeo no miembro de la UE * 100 / Población total	INM
PcP_Africa	Población nacida en África * 100 / Población total	INM
PcP_AmeCSC	Población nacida en América Central, del Sur o Caribe * 100 / Población total	INM
PcP_Asia	Población nacida en Asia * 100 / Población total	INM
PcPEx_1Gra	Población de nacionalidad extranjera con estudios de primer grado * 100 / Población de nacionalidad extranjera	INM (EDU)
PcP65m_NoP	Población soltera, separada, divorciada o viuda de 65 y más años * 100 / Población de 65 y más años	FAM (EDA)
PcP65m_Sol	Población de 65 y más años que vive sola * 100 / Población de 65 y más años (01/01/2012)	FAM (EDA)
PcP_Inval	Población con invalidez permanente * 100 / Total de población en viviendas principales	INV
PcP_Paro	Población parada que ha trabajado o buscando 1 ^{er} empleo * 100 / Población entre 16 y 64 años (ambos incluidos)	LAB
PcP_Temp	Población trabajadora eventual o temporal * 100 / Población entre 16 y 64 años (ambos incluidos)	LAB
PcP_IndCon	Artesanos y trabajadores de la industria manufacturera o la construcción * 100 / Población entre 16 y 64 años (ambos incluidos)	LAB
PcP_Instal	Operadores de instalaciones y maquinaria o montadores * 100 / Población entre 16 y 64 años (ambos incluidos)	LAB
PcP_Elem	Población con ocupaciones elementales * 100 / Población entre 16 y 64 años (ambos incluidos)	LAB
RPC2013	Renta per cápita (2013) sobre población (01/01/2014)	RPC
PcV_NoCale	Viviendas principales sin calefacción * 100 / Total de viviendas principales	VIV
PcV_NoInte	Viviendas principales sin acceso a internet * 100 / Total de viviendas principales	VIV
PcV_4NoAsc	Viviendas principales en edificios sin ascensor situadas en plantas 4 ^a y superiores * 100 / Total de viviendas principales	VIV
PcV_EdDefi	Viviendas principales en edificio ruinoso, malo o deficiente * 100 / Total de viviendas principales	VIV
PcV_NoAcce	Viviendas principales sin instalaciones de accesibilidad * 100 / Total de viviendas principales	VIV
PcP_CSP8	Población residente a > 800 m en línea recta de cualquier centro de salud público (CSP) (04/2016) o consultorio de salud (05/2016) aunque sea de otro distrito * 100 / Población total (01/01/2015)	SAL
PcP_CEP25	Población residente a > 2500 m en línea recta de cualquier centro de especialidades público (CEP) (05/2015) aunque sea de otro distrito * 100 / Población total (01/01/2015)	SAL
PcP_CSS10	Población residente a > 1000 m en línea recta del centro de servicios sociales (CSS) (05/2015) que presta cobertura asistencial a su barrio * 100 / Población total (01/01/2015)	SAL

Nota: la fecha de referencia de los indicadores es la de los Censos de Población y Vivienda de 2011 del INE, salvo cuando se explicita otra. Fuente: elaboración propia.

4.4. Las relaciones estadísticas entre indicadores de VSA

Para explorar las relaciones entre los datos, la matriz de los 27 indicadores por 119 barrios fue sometida a un análisis de componentes principales (ACP) el cual arrojó 5 dimensiones (con autovalor > 1), capturando el 77,7 % de la varianza (*vid.* Moreno y Vidal, 2018). La estructura factorial rotada (Varimax) se interpretó como sigue:

1. El primer factor bipolar (32,3 % de la varianza total) apunta a una dimensión general de “condiciones desfavorables” económicas, educativas, laborales y residenciales, incidentes en la VSA, y que rememora el clásico factor de estatus socioeconómico de los estudios sociales urbanos.
2. El segundo factor, también bipolar y con 16,7 % de la varianza, acoge los condicionantes de la VSA asociados a los “estadios extremos del ciclo vital con algunas privaciones habitacionales”. Ambos polos, opuestos en el patrón factorial, señalan situaciones y rasgos que, sin embargo, apuntarían a una mayor VSA.
3. El tercer factor, unipolar y con un 15,3 % de la varianza, representa sobre todo a la “inmigración extranjera, bajo nivel educativo y viviendas algo desfavorecidas”.
4. El factor cuarto, con solo dos variables relevantes (5,1 % de la varianza), singulariza espacialmente a los “inmigrantes europeos (no UE) y algo a los asiáticos”.
5. Finalmente, en el factor quinto (8,2 % de la varianza) afloran coeficientes de intensidad media sobre todo, alusivos a “baja accesibilidad espacial a equipamientos de salud y sociales (polo negativo) y algo la invalidez (polo positivo)”.

Como balance cabe reseñar que el ACP compendia buena parte de los indicadores en solo 5 factores, sin embargo la estructura factorial resultante (y las puntuaciones factoriales derivadas) presentan ciertos inconvenientes para su combinación en un índice sintético: factores bipolares que contradicen la incidencia lógica sobre la vulnerabilidad (tal como se estableció por los expertos del Delphi), pérdida de una parte de la varianza de algunos indicadores de resiliencia o debilidad, dificultad para incorporar ponderaciones acordes a los juicios de los expertos, etc. Por todo ello se eligió una vía alternativa para el índice de vulnerabilidad socio-ambiental relativa (IVuSA-R) buscado, que se expone a continuación.

5. Diseño, construcción y análisis del índice IVuSA-R

El protocolo metodológico para construir índices sintéticos es bien conocido (*e. g.* Coombes y Wong, 1994) y existen varias posibilidades instrumentales para ello. En este apartado se expondrá el proceso seguido y se explicarán las decisiones metodológicas fundamentales.

Con el método Delphi antes descrito quedó determinada una serie de aspectos relevantes de la VSA, así como un conjunto de indicadores pertinentes para expresarlos estadísticamente. Además se disponía de las valoraciones promedio (en un rango de 1-5) que el panel de expertos planteó sobre la incidencia de tales aspectos en la VSA (*vid.* tabla 1). A partir de ahí, los indicadores fueron agrupados por facetas con significado distintivo (tabla 3), con el resultado de que algunas contaban con varios indicadores, mientras que otras solo uno. Por otro lado algunos indicadores, por su formulación, involucraban a más de una faceta, aunque en grado desigual, por lo que su adscripción se realizó sólo a la principal, quedando el resto de facetas como secundarias.

5.1. La formulación operativa del IVuSA-R

El enfoque dominante para combinar los elementos relevantes en un índice expresivo de un concepto complejo suele ser el aditivo, eventualmente tras una síntesis mediante técnicas como el ACP o la normalización de los valores de las variables. Los procedimientos comunes adoptan estadísticos de tipo promedio en sus diversas variantes (aritmético, geométrico, cuadrático, ponderado, etc.). En cualquier caso, lo importante es adoptar unas decisiones técnicas de forma explícita y justificada, de cara a posibilitar la crítica, la réplica y la posible mejora. Esencialmente, las cuestiones a solventar y las opciones elegidas aquí han sido éstas:

- A. Combinación de los indicadores contribuyentes a cada faceta de la vulnerabilidad. La desigual disponibilidad de datos, su representatividad y valoración con el método Delphi pueden conducir, como se ha visto, a una presencia desigual de indicadores por faceta. Aquí, tras considerar el significado de cada indicador en su amplitud y relevancia, se eligió para esta amalgamación la media ponderada, la cual permite asignar a cada uno de ellos una importancia (peso) desigual a la hora de representar la faceta a la que pertenecen.
- B. Integración de las facetas en el indicador sintético. Entre otras posibilidades que la estadística ofrece (*vid.* Moreno *et al.*, 2016), se optó de nuevo por la media ponderada (descartando la isoponderación), en aras de posibilitar una especificación flexible de la contribución de cada faceta al instrumento métrico final. Procede advertir que la subjetividad inherente a los pesos mencionados no queda soslayada, sino que se ha sustentado en el “consenso intersubjetivo”, a partir de la consulta Delphi antes descrita y mediante las decisiones metodológicas que se exponen en el apéndice.

De forma simple, la fórmula adoptada para el indicador IVuSA-R es como sigue:

$$[1] \quad v_i = \frac{\sum_{k=1}^K \left(\frac{\sum_{j \in K} y_{ij} * w_{jk}}{\sum_{j \in K} w_{jk}} \right) * p_k}{\sum_{k=1}^K p_k}$$

siendo:

v_i = valor del índice IVuSA-R en el barrio i ;

y_{ij} = valor del indicador j en el barrio i ;

w_{jk} = peso del indicador j perteneciente a la faceta k ;

p_k = peso de la faceta k .

Se trata, como se ve, de una serie de medias ponderadas recursivas, estructuradas en dos niveles jerárquicos: el de los indicadores primero (el paréntesis en el numerador de la fracción), y el de las facetas después.

En síntesis, la variada casuística afrontada para combinar jerárquicamente indicadores y facetas se solventó imputando, dentro de cada faceta, diferentes pesos a sus indicadores según su desigual contribución a la vulnerabilidad, y luego adoptando diferentes pesos para las facetas, de

cara a su integración en el índice compuesto IVuSA-R. A continuación se describen los criterios metodológicos para la estandarización cuantitativa de los datos y la ponderación de los mencionados componentes en el índice.

5.2. Procedimiento de normalización y ponderación de los indicadores

La integración de variables con unidades métricas dispares en una fórmula como la del IVuSA-R precisa de una previa normalización. Los procedimientos para ello son diversos, y cada uno posee propiedades que pueden implicar ventajas o desventajas. En nuestro caso se ha optado por la conocida fórmula que impone una igualación de la amplitud total de todos los indicadores, de manera que los nuevos valores oscilen entre 1 (el mayor) y 0 (el menor), si bien se mantiene la posición relativa de los datos. Para un indicador cualquiera x , la fórmula sería:

$$[2] \quad y_i = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}$$

siendo:

y_i = valor estandarizado del indicador en el barrio i ;

x_i = valor original del indicador en el barrio i ;

x_{max} = valor máximo alcanzado en ese indicador;

x_{min} = valor mínimo alcanzado en ese indicador.

Para un caso concreto, la renta per cápita, por expresar un fenómeno que propendería a reducir la vulnerabilidad al aumentar su valor, ha sido sometida a una triple operación:

- a. En primer lugar, ha sido transformada logarítmicamente. Ello provoca que los valores altos se aminoren más que proporcionalmente y que, viceversa, las diferencias entre los valores bajos se vean aumentadas. La motivación para ello es análoga a la del conocido Índice de Desarrollo Humano (IDH) del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD): se asume aquí que la vulnerabilidad, mayor en las rentas bajas, no se reduce linealmente con la renta, sino de forma más que proporcional y rápida, a medida que ésta última crece.
- b. En segundo lugar, se ha normalizado por su amplitud (ecuación [2]).
- c. Por último, se ha aplicado una trasposición de esta forma: $y'_i = 1 - y_i$, para que los valores altos impliquen más vulnerabilidad y viceversa.

De esta manera su integración en el índice sintético tendrá un signo coherente con los otros indicadores y su aportación al mismo se verá “modulada” de forma no lineal, a diferencia del resto de los indicadores.

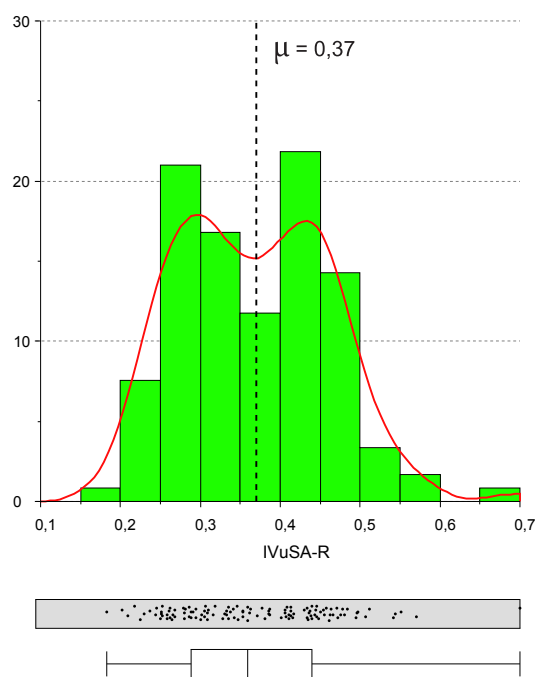
La delicada fase de asignar pesos a los indicadores y facetas de la VSA se solventó partiendo de las valoraciones de la consulta Delphi (tabla 1) y del análisis estadístico de los indicadores, y aplicando luego una serie de decisiones lógicas. El Apéndice exhibe dichos pesos.

5.3. Análisis de resultados: el IVuSA-R en la ciudad de Madrid

La aplicación de la fórmula [1] a los indicadores de la ciudad de Madrid produjo el índice de vulnerabilidad para cada barrio, oscilando los valores del IVuSA-R entre 0,18 y 0,70, con una media de 0,37. Su distribución estadística, según el histograma y la línea de densidad (parámetro de suavizado = 0,30) (*vid.* figura 2), exhibe un aspecto bimodal con una depresión en el entorno de la media. Su similitud con la gaussiana resulta algo incierta, pues según el test de Kolmogorov-Smirnov no se podría rechazar esa hipótesis, mientras que la *W* de Shapiro-Wilk rechaza la normalidad (probabilidad = 0,013). Presenta solo una leve asimetría positiva (0,38).

La figura 3 permite comparar los valores del IVuSA-R entre barrios, definiendo un patrón marcado por dos rasgos. Por un lado, se aprecia una concentración de los valores de mayor vulnerabilidad relativa al sur (distritos de Puente de Vallecas, Usera y buena parte de Villaverde, Carabanchel y Latina) y al este (una parte importante de los distritos de Ciudad Lineal y San Blas, así como ciertos barrios de Moratalaz, Vicálvaro y Barajas). Por otro lado, los valores menos elevados se sitúan en la zona central de la ciudad (distritos de la almendra central, a excepción de Tetuán y parte de Centro) y en todo el arco periférico NE-N-NW.

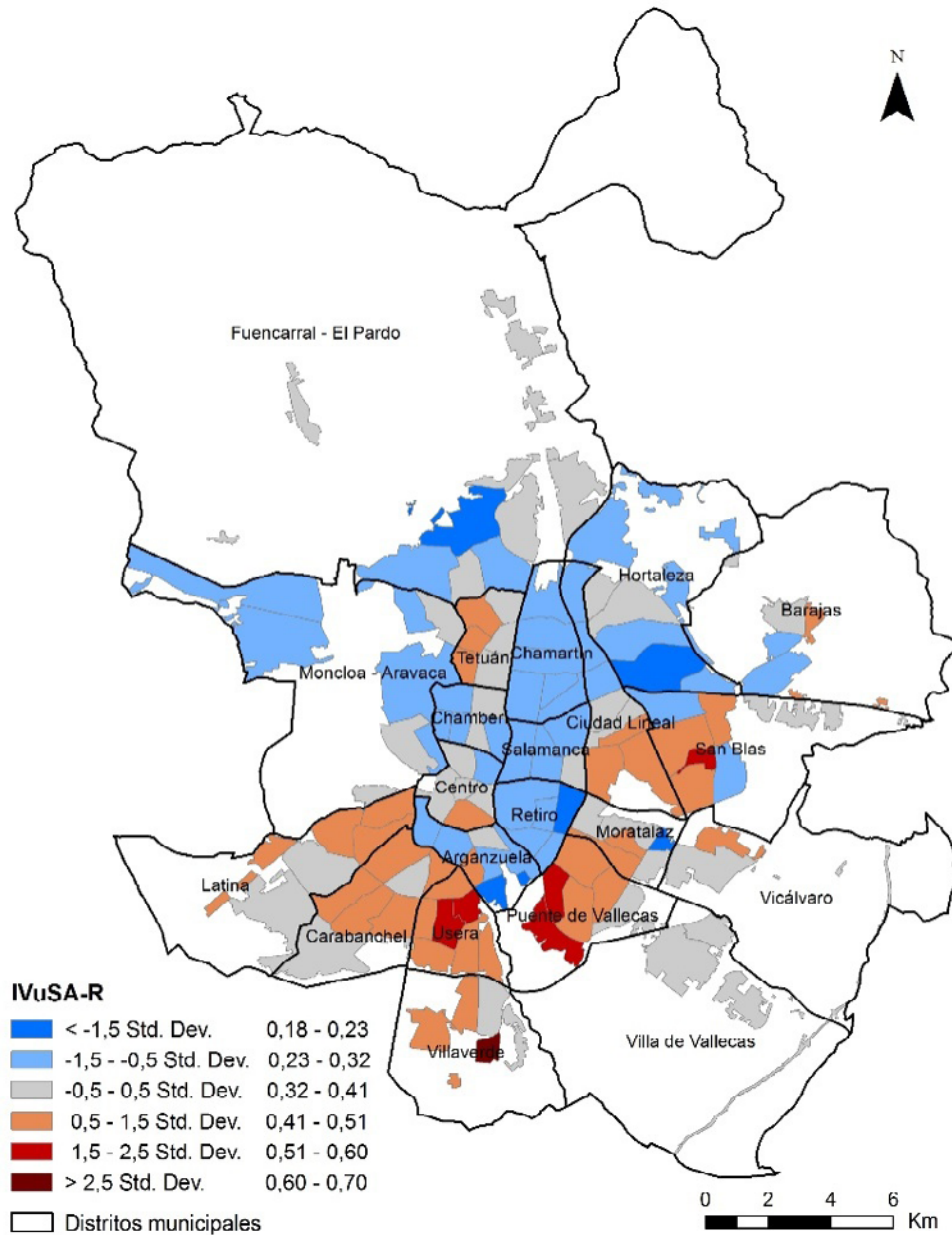
Figura 2. Distribución de los barrios de la ciudad (AUP) de Madrid según el índice IVuSA-R



Fuente: elaboración propia.

En síntesis, es de destacar en primer lugar la notable polarización espacial de los valores altos y bajos, y en segundo lugar que el índice exhibe valores bastante similares dentro de los distritos, a excepción de San Blas, Barajas, Moratalaz y Centro, que parecen algo más heterogéneos. Ese contraste del IVuSA-R entre grandes zonas se plasma en una autocorrelación espacial positiva, tal como confirma el coeficiente *I* de Moran con valor 0,447 (basado en relaciones espaciales de contigüidad de bordes).

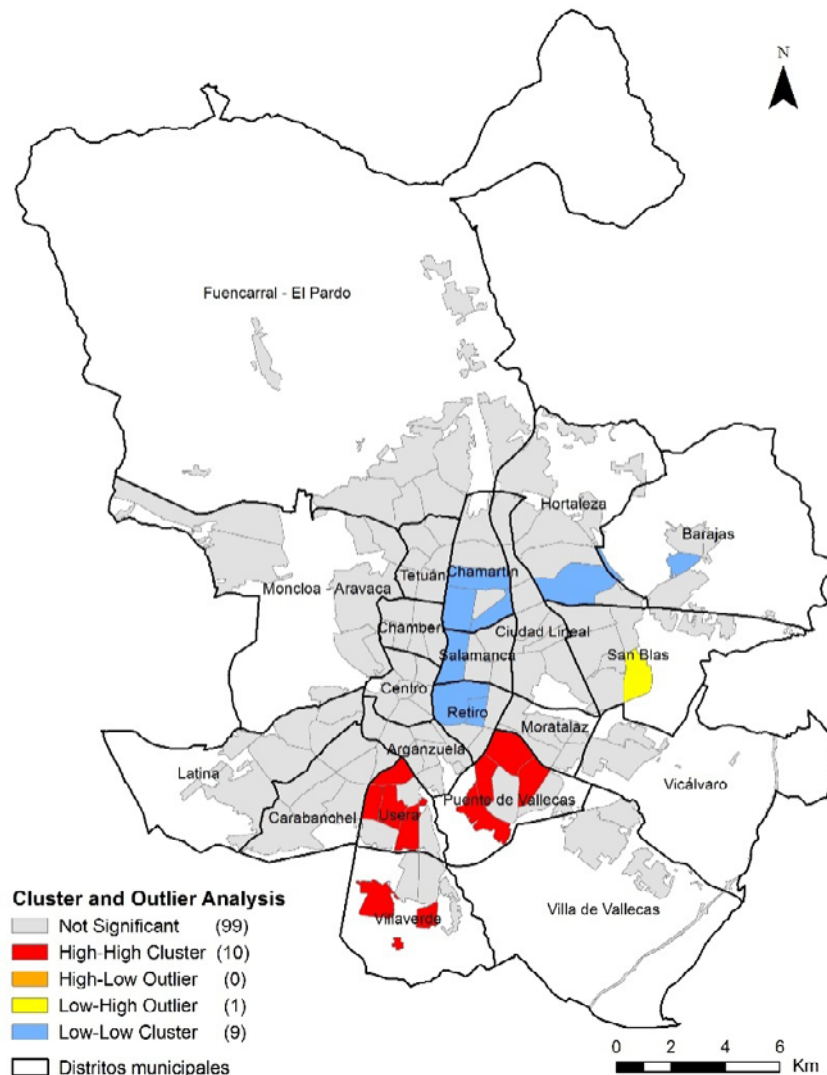
Figura 3. Índice IVuSA-R por barrios en la ciudad (AUP) de Madrid



Fuente: elaboración propia.

La técnica LISA (*Local Indicators of Spatial Association*) aplicada al IVuSA-R permite detectar, dada su lógica de cálculo, las polarizaciones mejor definidas de la ciudad. Con ella se ha generado la figura 4, mostrando las concentraciones espaciales estadísticamente significativas de altos y bajos valores del IVuSA-R. En dicho mapa destacan como zonas urbanas “calientes” (barrios de alta vulnerabilidad, rodeados de otros barrios similares) varios del sur en los distritos de Puente de Vallecas, Usera y Villaverde, y como zonas “frías” (baja vulnerabilidad) una franja de orientación meridiana al E del eje Prado-Recoletos-Castellana, en el interior de la ciudad (distritos de Chamartín, Salamanca y Retiro), y en algunos del nordeste (distritos de Hortaleza y Barajas). La técnica también ha identificado algún barrio “anómalo” (valores altos rodeados de bajos o viceversa). En el resto de la ciudad la posible similitud-disimilitud de valores del IVuSA-R entre barrios adyacentes se revela como no significativa.

Figura 4. Manchas “calientes” (rojo) y “frías” (azul) de vulnerabilidad en los barrios (AUP) de Madrid a partir de la técnica LISA aplicada al IVuSA-R



Fuente: elaboración propia.

6. Hacia una estimación de la vulnerabilidad socio-ambiental absoluta, IVuSA-A

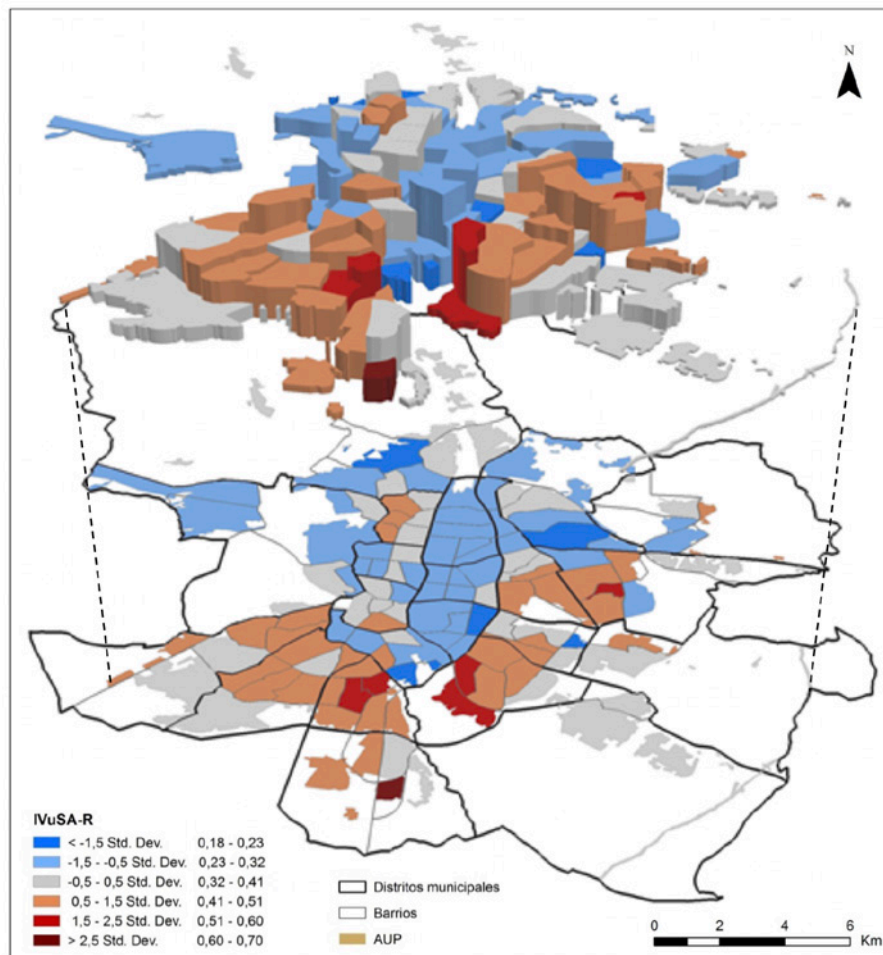
Un índice como el IVuSA-R permite desvelar en qué lugares de la ciudad el nivel de vulnerabilidad es más alto o más bajo a partir de unos indicadores, mayoritariamente formulados en términos relativos o proporcionales. Sin embargo, resulta también necesario conocer la magnitud absoluta de dicha vulnerabilidad. Un barrio puede tener un IVuSA-R muy elevado, pero al mismo tiempo contar con una población escasa y viceversa. La puesta en marcha de políticas bien ajustadas habría de tener en cuenta, por tanto, no solo la vulnerabilidad en términos relativos en una zona, sino también la cifra de personas allí residentes a las que “imputar” ese nivel de vulnerabilidad.

Sin perjuicio de análisis más refinados y discriminantes, una primera aproximación a esa magnitud de “vulnerabilidad absoluta” podría apoyarse en la cifra total de residentes del barrio. Dada la desigual superficie de los barrios, recurrir al concepto de densidad de población, como han pro-

puesto Masterson *et al.* (2014, p. 105) y Moreno y Martínez (2016), posibilitaría aprehender esa vulnerabilidad absoluta y comparar su cuantía sobre la base de unidades superficiales comunes (por ejemplo, por ha), evitando así ese conocido error perceptual.

Para la plasmación cartográfica, el uso de la visualización en perspectiva 3D ofrece para ello la ventaja de integrar de manera eficaz dos variables cuantitativas, y así en la figura 5 se muestran como prismas extruidos la densidad de habitantes en cada barrio (según los Censos de 2011), como “*proxy*” del colectivo global de vulnerables potenciales, y el IVuSA-R como capa cromáticamente graduada que transmite el grado relativo de vulnerabilidad. Aunque algo más compleja de comprender, la imagen resultante incorpora ambos componentes de la vulnerabilidad y, por ende, facilita una visión más rica y exacta de esa realidad. En ella se aprecia cómo ciertos barrios sureños de elevada vulnerabilidad poseen unas densidades contrastadas, alguna alta, pero también medias o bajas. Vulnerabilidades medio-altas con densidades notables aparecen sobre todo en varias zonas semi-periféricas de la ciudad (E, SE y SW).

Figura 5. Barrios en la ciudad (AUP) de Madrid mostrando la densidad de población (prismas) y la vulnerabilidad socio-ambiental relativa IVuSA-R (paleta de color)



Fuente: elaboración propia.

El mapa anterior resulta útil para mostrar la “densidad geográfica de la vulnerabilidad”, sin embargo para determinar y asignar recursos públicos por zonas, en función de su vulnerabilidad absoluta, no constituye un instrumento adecuado. A tal fin cabría aducir el principio de justicia

espacial de adjudicar tales recursos “según las necesidades de cada zona”, asumiendo que la proporcionalidad debe estar en función de la población, es decir, per cápita, y no tanto de la superficie de su territorio. Sobre tal premisa cabe postular una estimación de la vulnerabilidad absoluta en cada zona, $IVuSA-A_i$, como una sencilla función integrando la población residente, P_i , y el $IVuSA-R_i$ en cada barrio, de esta forma:

$$[3] \quad IVuSA-A_i = P_i * IVuSA-R_i$$

La lógica de la expresión estriba en imputar (y ponderar) a cada residente el nivel de vulnerabilidad relativa de su barrio y generar un número que traduciría ambos componentes. Para facilitar la interpretación, resulta conveniente escalar los valores del $IVuSA-A_i$ de modo que su total coincida con la cifra total de población de la ciudad, P (en 2011), mediante esta sencilla expresión:

$$[4] \quad IVuSA-A_i^e = (IVuSA-A_i / \sum IVuSA-A_i) * P$$

En la figura 6 se representa el $IVuSA-A_i^e$, el cual ya ofrece una visión integrada de esas dos medidas de la vulnerabilidad socio-ambiental, tal como en este trabajo se han concebido y desarrollado. Un producto cartográfico como ese (y sus valores asociados por barrios) trasmite ya a los decisores unas magnitudes expresivas de la “vulnerabilidad” a atender en cada una de esas hipotéticas unidades de gestión municipal (o agregarlas por distritos). Ahora quedan más exactamente expuestos los barrios de la mitad sur de la ciudad, junto con algunos de la periferia norte, donde concurre mayor vulnerabilidad y hacia los que apuntar las eventuales acciones preventivas o paliativas.

Figura 6. $IVuSA-A_i^e$ de la población por barrios en la ciudad (AUP) de Madrid, ponderada por su vulnerabilidad socio-ambiental relativa ($IVuSA-R_i$), mediante círculos proporcionales



Fuente: elaboración propia.

7. Discusión

Los estudios de la vulnerabilidad humana apuntan a una progresiva segmentación de los entes, manifestaciones y peligros, de cara a penetrar mejor en los nexos entre éstos y aquéllos y a atender la especificidad de cada contexto geográfico. Este trabajo se inscribe en esa línea, focalizándose en la vulnerabilidad de las personas, con sus circunstancias, ante los problemas de degradación del aire en ciudades como las españolas. Se glosarán aquí ciertas cuestiones metodológicas y de logros, especialmente destacables por su interés para otros investigadores o para aplicaciones.

Habiendo adoptado la aproximación centrada en los indicadores estadísticos atinentes a dicha vulnerabilidad, lo primero a dilucidar ha sido la identificación y selección de factores incidentes en la misma. En ocasiones ello se ha resuelto mediante una motivación razonada de los autores, apoyada en el conocimiento bibliográfico sobre el problema o parcelas afines (*e. g.* Moreno *et al.*, 2017). Aproximaciones más fundamentadas han recurrido, bien a encuestas a grupos objetivo vulnerables (*e. g.* Sánchez y Chávez, 2016; Chávez y Sánchez, 2016), bien a análisis estadísticos de la relación entre factores ambientales y efectos sobre las personas, comunes en estudios sobre salud (*e. g.* Deguen y Zmirou-Navier, 2010). Yáñez y Muñoz (2017) han recurrido a consultas a diversos grupos participantes, adoptando el enfoque de la evaluación multicriterio, para esos fines. Así se recopilan evidencias de las relaciones entre condicionantes y vulnerabilidad, si bien ello resulta gravoso y a veces difícil de implementar cuando se trata de ciertos grupos de población (por ejemplo públicos infantiles, los “sin techo”, etc.). En nuestro trabajo se ha optado por una consulta selectiva a expertos mediante la técnica Delphi, como hicieron Emrich (2005) y Greiving *et al.* (2006) para la evaluación de riesgos espaciales. Ella supuso una ventaja para la compilación ágil y consensuada de los aspectos significativos, y para una elucidación de su importancia en el contexto geográfico de estudio, posibilitando luego la derivación de pesos para modular la desigual incidencia de los distintos factores en la vulnerabilidad.

Al cotejar los abundantes estudios de vulnerabilidad socio-ambiental brota el delicado asunto del elenco de indicadores adoptados: las fuentes censales o administrativas disponibles constriñen (en variedad / cobertura, desagregación espacial y periodicidad) las posibilidades de elección, lo que ha excluido aspectos como la morbilidad respiratoria y afectado a la comparación de resultados (sobre todo entre países o regiones y en el tiempo) y a la deseable estandarización metodológica. Por este motivo aquí se ha apelado a una aplicabilidad de los hallazgos solo al ámbito español.

El segundo asunto en este tipo de estudios estriba en la síntesis de esa variedad de condicionantes. Las técnicas de análisis multivariado (ACP y/o de clasificación, *clustering*) se cuentan entre las habituales, sobre todo cuando se abordan problemas de vulnerabilidades múltiples de los lugares, construyendo sobre tales resultados intermedios los índices sintéticos de vulnerabilidad (*e. g.* Cutter *et al.*, 2003; Borden *et al.*, 2007; Emrich *et al.*, 2012; Rufat, 2013). El ACP aplicado en esta investigación, sin embargo, generó una estructura simple (con factores bipolares, de integración poco convincente y de ponderación controvertible), que aconsejó retener los indicadores originales de las facetas como elementos del índice. El uso de un promedio estructurado en dos niveles jerárquicos de ponderación ha permitido una especificación flexible y reproducible de los componentes en la fórmula del IVuSA-R.

Al cotejar nuestro estudio con el del Ayto. de Madrid (2018) se aprecian estas diferencias notables: en éste último se busca un índice de vulnerabilidad general (y no específico ante la degradación del aire) que se apoya en la bibliografía y los expertos del equipo de investigación para la selección

de criterios, indicadores y ponderaciones (en nuestro caso, mediante Delphi formal a expertos externos), y los resultados se presentan para un ámbito que incluye las partes no urbanas del municipio (con la consiguiente inexactitud espacial). Aunque el mapa de sus resultados se asemeja bastante a nuestro IVuSA-R (dado que el síndrome de bajo estatus socioeconómico, privaciones, pobreza, etc. también cursa con vulnerabilidad), afloran divergencias en la posición relativa de vulnerabilidad de bastantes barrios, imputables a las diferencias de datos y métodos utilizados.

Finalmente, procede subrayar que nuestro estudio ha priorizado la usabilidad de los resultados por públicos varios (decisiones, asociaciones, expertos, etc.) obteniendo productos significativos y aprehensibles: dos estimadores de la vulnerabilidad (relativa y absoluta) en cada barrio, facilitando las decisiones sobre el reparto espacial de recursos de protección / prevención, acordes con la necesidad (justicia espacial distributiva); y una cartografía en 2D y 2,5D que visualiza de forma reveladora la elusiva geografía de esa vulnerabilidad dentro de la ciudad.

8. Conclusiones

La fecunda línea de investigaciones sobre el poliédrico concepto de vulnerabilidad se está desvelando muy versátil y cognitivamente útil para informar políticas enfocadas a un desarrollo humano y territorial más completo. Ello puede vincularse con la conciencia cada vez más extendida de que unas sociedades justas, solidarias y proactivas deberían velar por la mitigación de los considerables infortunios ambientales que ciertos grupos de personas, por su mayor fragilidad, suelen soportar en su espacio vital. Establecidos los componentes fundamentales del concepto, los abundantes trabajos están profundizando en el análisis de distintos tipos de vulnerabilidades, que brindan resultados valiosos para prevenir y actuar ante amenazas específicas.

En este trabajo se ha puesto el foco en la vulnerabilidad social hacia un problema ambiental que ocasiona no pocas desigualdades en el seno de las grandes ciudades: la calidad del aire. De cara a una aprehensión cuantitativa de aquella se ha abordado primero una identificación de las facetas e indicadores relevantes de esa vulnerabilidad y una dilucidación de su importancia relativa (pesos) mediante la técnica Delphi. Junto con otras vías basadas en encuestas a grupos de población significativos y análisis estadísticos relacionando factores-efectos, entendemos que esa metodología ofrece una aproximación ágil y acreditada para acotar determinantes de esa fragilidad humana en un contexto geográfico y ante unas amenazas ambientales concretas.

El tratamiento de los indicadores mediante ACP desveló las relaciones entre ellos y generó resultados expresivos, pero algunas limitaciones de la estructura factorial simple y de las puntuaciones factoriales aconsejaron recurrir, como técnica más flexible para medir sintéticamente la vulnerabilidad, a un promedio de los indicadores originales, con dos niveles de agregación y ponderación.

Junto al índice de vulnerabilidad relativa se obtuvo una medida de la magnitud de vulnerabilidad absoluta por zonas de la ciudad, considerando la cifra de población residente. Ella proporcionó unos guarismos más correctos sobre la necesidad de protección por barrios, para implementar acciones de mitigación y alerta geolocalizadas y, eventualmente, asignar recursos para tales fines. No se ha tratado en nuestro caso la intensidad de la amenaza (*i. e.* de la degradación del aire), que algunos estudios ya están aventurando como funciones cuantitativas de vulnerabilidad (*vid.* Schneiderbauer *et al.*, 2017, pp. 77-79). Ello queda para futuros trabajos, así como una posible

validación de los indicadores obtenidos confrontándolos con algunas de sus consecuencias (morbilidad / mortalidad asociable a la contaminación del aire).

En el caso de la ciudad de Madrid nuestro análisis ha revelado un patrón espacial con marcados contrastes, siendo la vulnerabilidad relativa más aguda en los barrios situados en un arco periférico que recorre el E-S-SW. La vulnerabilidad absoluta, por su parte, confirma la dominante S de la vulnerabilidad socio-ambiental, aunque aparecen también algunos barrios algo destacados en el N. Ambas imágenes invitan a un cotejo ulterior con los niveles de contaminación del aire dentro de la ciudad para avizorar políticas locales mejor ajustadas social y espacialmente o abordar diagnósticos de injusticias ambientales más certeros.

9. Bibliografía

- Adger, W. N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16 (3), 268-281.
- Alguacil, J. (2006). Barrios desfavorecidos: un diagnóstico de la situación española. En FUHEM-Icaria V (Ed.), *Informe FUHEM de políticas sociales: La exclusión social y Estado de Bienestar en España* (pp. 155-168). Madrid, España.
- Alguacil, J., Camacho, J. & Hernández, A. (2014). La vulnerabilidad urbana en España. Identificación y evolución de los barrios vulnerables. *Empiria. Revista de Metodología de Ciencias Sociales*, vol. 27, 73-94.
- Armas, I., Ionescu, R., Gavris, A. & Toma-Danila, D. (2016). Identifying seismic vulnerability hotspots in Bucharest. *Applied Geography*, vol. 77, 49-63.
- Ayuntamiento de Madrid (2018). *Metodología para la elaboración del índice de vulnerabilidad territorial de barrios y distritos de Madrid y ranking de vulnerabilidad*. Área de Coordinación Territorial y Cooperación Público Social, Servicio de Estudios y Evaluación Territorial.
- Bello, W. (2013). Vulnerabilidad socio-demográfica de las personas de la tercera edad. *Cuadernos Geográficos*, vol. 52, nº 1, 153-177.
- Berry, P. M., Rounsevell, M. D. A., Harrison, P. A. & Audsley, E. (2006). Assessing the vulnerability of agricultural land use and species to climate change and the role of policy in facilitating adaptation. *Environmental Science & Policy*, vol. 9, 189-204.
- Bertoux, L. & González, D. (2015). Vulnerabilidad y resiliencia urbana frente al cambio climático: el caso de la zona metropolitana de Guadalajara, México. *Revista Urbano*, vol. 31, 24-31.
- Birkmann, J. (2006a). Measuring vulnerability to promote disaster-resilient societies: conceptual frameworks and definitions. En Birkmann, J. (Ed.), *Measuring vulnerability to natural hazards: Towards disaster resilient societies* (pp. 9-54). Tokyo, Japón: United Nations University Press.
- Birkmann, J. (2006b). Indicators and criteria for measuring vulnerability: Theoretical bases and requirements. En Birkmann, J. (Ed.), *Measuring vulnerability to natural hazards: Towards disaster resilient societies* (pp. 55-77). Tokyo, Japón: United Nations University Press.
- Borden, K. A., Schmidlein, M. C., Emrich, C. T., Piegorsch, W. W. & Cutter, S. L. (2007). Vulnerability of U.S. Cities to Environmental Hazards. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, vol. 4, nº 2. doi: 10.2202/1547-7355.1279
- Brooks, N. (2003). Vulnerability, risk and adaptation: a conceptual framework. *Tyndall Centre for Climate Change Research Working Paper*, nº 38, 1-16. Norwich, Reino Unido: University of East Anglia.
- Cardona, O. D. (2003). La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo: una crítica y una revisión necesaria para la gestión. En *Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, La Red*. Recuperado de <http://www.desenredando.org/public/articulos/2003/rmhcvr/>
- Chávez-Alvarado, R. & Sánchez-González, D. (2016). Envejecimiento vulnerable en hogares inundables y su adaptación al cambio climático en ciudades de América Latina: el caso de Monterrey. *Papeles de Población*, vol. 90, 9-42. doi: <http://dx.doi.org/10.22185/24487147.2016.90.033>
- Collins, T. W., Grineski, S. E. & Romo-Aguilar, M. L. (2009). Vulnerability to environmental hazards in the Ciudad Juárez (México)-El Paso (USA) metropolis: A model for spatial risk assessment in transnational context. *Applied Geography*, vol. 29, 448-461.

- Coombes, M. & Wong, C. (1994). Methodological steps in the development of multivariate indexes for urban and regional policy analysis. *Environment and Planning A*, 26, 1297-1316.
- Couch, S. & Coles, C. (2011). Community stress, psychosocial hazards, and EPA decision-making in communities impacted by chronic technological disasters. *American Journal of Public Health*, vol. 101, 140-148.
- Coy, M. (2010). Los estudios del riesgo y de la vulnerabilidad desde la geografía humana. Su relevancia para América Latina. *Población & Sociedad*, vol. 17, n° 1, 9-28.
- Cutter, S. L., Boruff, B. J. & Shirley, W. L. (2003). Social vulnerability to environmental hazards. *Social Science Quarterly*, vol. 84, n° 2, 242-261.
- Cutter, S. L. & Corendea, C. (Eds.) (2013). *From social vulnerability to resilience: Measuring progress toward disaster risk reduction*. Bonn, Alemania: United Nations University, Institute for Environment and Human Security (UNU-EHS).
- Cutter, S., Emrich, C., Webb, J. & Morath, D. (2009). *Social vulnerability to climate variability hazards: A review of the literature. Final Report to Oxfam America*. Columbia, USA: University of South Carolina. Recuperado de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.458.7614&rep=rep1&type=pdf>
- Cutter, S., Mitchell, J. & Scott, M. (2000). Revealing the vulnerability of people and places: a case study of Georgetown County, South Carolina. *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 90, n° 4, 713-737.
- D'Ercole, R. & Metzger, P. (2009). La vulnérabilité territoriale: une nouvelle approche des risques en milieu urbain. *Cybergeo: European Journal of Geography*, Informes temáticos, documento 447. Recuperado de <http://journals.openedition.org/cybergeo/22022>. doi: 10.4000/cybergeo.22022
- Deguen, S. & Zmirou-Navier, D. (2010). Social inequalities resulting from health risks related to ambient air quality-A European review. *The European Journal of Public Health*, vol. 20, n° 1, 27-35. Recuperado de <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckp220>
- Domínguez, J., Egea, C. & Nieto, J. A. (2009). Espacio urbano y vulnerabilidad comunitaria. Efectos socio-ambientales de la estructura urbana en las áreas desfavorecidas de Andalucía. *Zainak*, vol. 32, 897-913.
- Dwyer, A., Zoppou, C., Nielsen, O., Day, S. & Roberts, S. (2004). Quantifying social vulnerability: A methodology for identifying those at risk to natural hazards. *Geoscience Australia Record* 2004/14. Australian Government. Recuperado de <http://www.geosci.usyd.edu.au/users/prey/Teaching/Geos-111GIS/Ref/GA4267-IdentifyingRisks.pdf>
- Eakin, H. & Luers, A. (2006). Assessing the vulnerability of social-environmental systems. *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 31, n° 1, 365-394.
- Egea, C., Sánchez, D. & Soledad, J. (2012). *Vulnerabilidad social: posicionamiento y ángulos desde geografías diferentes*. Granada, España: Editorial Universidad de Granada.
- Egea, C., Nieto, J., Domínguez, J. & González, R. (2008). *Vulnerabilidad del tejido social de los barrios desfavorecidos de Andalucía. Análisis y potencialidades*. Sevilla, España: Centro de Estudios Andaluces.
- Emrich, Ch. T. (2005). *Social vulnerability in United States Metropolitan Areas: Improvements in hazard vulnerability assessment*. Doctorate of Philosophy, Geography, University of South Carolina.
- Emrich, Ch. T., Morath, D. & Buck, K. (2012). *Incorporating medical and social vulnerability into an all-hazards assessment for the State of Florida*. Columbia (SC), USA: Hazards and Vulnerability Research Institute, Department of Geography, University of South Carolina.
- Frazier, T. G., Thompson, C. M. & Dezzani, R. J. (2014). A framework for the development of the SERV model: A spatially explicit resilience-vulnerability model. *Applied Geography*, vol. 51, 158-172.
- Frigerio, I., Ventura, S., Strigaro, D., Mattavelli, M., De-Amicis, M., Mugnano, S. & Boffi, M. (2016). A GIS-based approach to identify the spatial variability of social vulnerability to seismic hazard in Italy. *Applied Geography*, vol. 74, 12-22.
- Greenberg, M. R. (2015). *Protecting seniors against environmental disasters. From hazards and vulnerability to prevention and resilience*. London & New York: Earthscan from Routledge, Taylor & Francis Group.
- Greiving, S., Fleischhauer, M. & Lückenkötter, J. (2006). A methodology for an integrated risk assessment of spatially relevant hazards. *Journal of Environmental Planning and Management*, vol. 49, n° 1, 1-19.
- Guezo, B. & Verrhiest, G. (2006). Réduire la vulnérabilité urbaine aux risques majeurs : Dossier - La montée en puissance de l'action publique pour maîtriser les risques urbains. La vulnérabilité urbaine, nouvelle porte d'entrée pour la prévention des risques urbains. Les outils de réduction de la vulnérabilité. *Techni. Cités*, 7 p. Recuperado de http://www.certu.fr/fr/_Projets_transversaux-n206/Vulnerabilite_urbaine_et_risque-n212/IMG

- Holand, I. & Lujala, P. (2013). Replicating and adapting an index of social vulnerability to a new context: a comparison study for Norway. *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 65, nº 2, 312-328.
- Holand, I., Lujala, P. & Ketil, J. (2011). Social vulnerability assessment for Norway: A quantitative approach. *Norsk Geografisk Tidsskrift - Norwegian Journal of Geography*, vol. 65, 1-17.
- Hung, L.-S., Wang, Ch. & Yarnal, B. (2016). Vulnerability of families and households to natural hazards: A case study of storm surge flooding in Sarasota County, Florida. *Applied Geography*, vol. 76, 184-197.
- Johnson, D. P., Stanforth, A., Lulla, V. & Lubber, G. (2012). Developing an applied extreme heat vulnerability index utilizing socioeconomic and environmental data. *Applied Geography*, vol. 35 (s1-2), 23-31.
- Kappes, M. S., Papathoma-Köhle, M. & Keiler, M. (2012). Assessing physical vulnerability for multi-hazards using an indicator-based methodology. *Applied Geography*, vol. 32, 577-590.
- Lafuente-Lechuga, M. & Faura-Martínez, U. (2012). Estudio de la vulnerabilidad a la exclusión social por Comunidades Autónomas en España (2005-2009). *Investigaciones Regionales*, vol. 23, 105-124.
- Lampis, A. (2013). Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático: debates acerca del concepto de vulnerabilidad y su medición. *Cuadernos de Geografía, Revista Colombiana de Geografía*, vol. 22, nº 2, 17-33.
- Linstone, H. A. & Turoff, M. (Eds.) (1975). *The Delphi method. Techniques and applications*. Reading, Addison-Wesley Publishing.
- Lixin, Y., Xi Z., Lingling, G. & Dong, Z. (2014). Analysis of social vulnerability to hazards in China. *Environmental Earth Sciences*, vol. 71, 3109-3117.
- Lo, L., Preston, V., Anisef, P., Basu, R. & Wang, S. (2015). *Social infrastructure and vulnerability in the suburbs*. Toronto, Canada: University of Toronto Press.
- Mainali, J. & Pricope, N. G. (2017). High-resolution spatial assessment of population vulnerability to climate change in Nepal. *Applied Geography*, vol. 82, 66-82.
- Malcomb, D. W., Weaver, E. A. & Krakowka, A. R. (2014). Vulnerability modeling for sub-Saharan Africa: An operationalized approach in Malawi. *Applied Geography*, 48, 17-30.
- Masterson, J. H., Peacock, W. G., Van-Zandt, S. S., Grover, H., Schwarz, L. F. & Cooper, J. T. (2014). *Planning for community resilience. A handbook for reducing vulnerability to disasters*. Washington, USA: Island Press.
- Moreno-Jiménez, A. & Martínez-Suárez, P. (2016). Detección de patrones intraurbanos de poblaciones ambientalmente vulnerables en grandes ciudades mediante estadística espacial y SIG. En Márquez-Domínguez, J. A. (Dir.), *Planificación territorial, desarrollo sustentable y geodiversidad* (pp. 1241-1254). Servicio de Publicaciones de la Diputación de Huelva.
- Moreno-Jiménez, A., Palacios-García, A. P. & Martínez-Suárez, P. (2016). Medición de la vulnerabilidad socio-ambiental intraurbana: un ensayo exploratorio basado en SIG. En Galacho-Jiménez, F. B., Vías-Martínez, J. & Reyes-Corredera, S. (Eds.), *Aplicaciones geotecnológicas para el desarrollo económico sostenible* (pp. 214-223). Actas del XVII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica. Málaga: Grupo de Tecnologías de la Información Geográfica, Asociación de Geógrafos Españoles (AGE) y Departamento de Geografía, European Topic Centre (ETC) y Facultad de Turismo de la Universidad de Málaga.
- Moreno-Jiménez, A. & Fuenzalida-Díaz, M. (2017). Medición y cartografía del impacto socialmente percibido ante industrias contaminantes con un estimador de densidad núcleo (kernel) y SIG: aplicación al caso del complejo industrial Ventanas, Chile. *Estudios Geográficos*, vol. LXXVIII, nº 282, 225-256. Recuperado de <http://estudiosgeograficos.revistas.csic.es/index.php/estudiosgeograficos/article/view/510>
- Moreno-Jiménez, A., Palacios-García, A. & Martínez-Suárez, P. (2017). Elaboración de un índice de vulnerabilidad socio-ambiental intraurbana apoyado en sistemas de información geográfica. En Allende, F. *et al.* (Eds.), *Naturaleza, territorio y ciudad en un mundo global* (2629-2638). Madrid, España: Dpto. de Geografía de la Universidad Autónoma de Madrid. Recuperado de <https://doi.org/10.15366/ntc.2017>
- Moreno-Jiménez, A. & Vidal-Domínguez, M. J. (2018). Propuesta de facetas e indicadores para medir la vulnerabilidad socio-ambiental intraurbana. En Alcántara, M., García-Montero M. & Sánchez-López F. (Coord.), *Ciencias y medio ambiente* (597-611). 56º Congreso Internacional de Americanistas. Salamanca, España: Universidad de Salamanca.
- Morrone, A., Scrivens, K., Smith, C. & Balestra, C. (2011). "Measuring vulnerability and resilience in OECD countries". En *Conferencia IARW-OECD sobre inseguridad económica*. París, Francia, 22-23 de noviembre de 2011.
- Palacios-García, A., Mateos-Rodríguez, P. & Hidalgo-Giralt, C. (2018). A theoretical and methodological essay on the concept of vulnerability. *Contexto*, vol. XIII, nº 17, 109-122.

- Pandey, R. & Bardsley, D. K. (2015). Social-ecological vulnerability to climate change in the Nepali Himalaya. *Applied Geography*, vol. 64, 74-86.
- Prieto-Flores, M. E., Moreno-Jiménez, A., Gómez-Barroso, D., Cañada-Torrecilla, R. & Martínez-Suárez, P. (2017). Contaminación del aire, mortalidad cardiovascular y grupos vulnerables en Madrid: un estudio exploratorio desde la perspectiva de la justicia ambiental. *Scripta Nova, Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, vol. XXI (2017), nº 559, 31 pp. Recuperado de <http://revistes.ub.edu/index.php/ScriptaNova/article/view/18008>
- Prieto-Flores, M. E., Gómez-Barroso, D., Cañada-Torrecilla, M. R. & Moreno-Jiménez, A. (2018). Exploring some socio-spatial and environmental inequalities of respiratory mortality in Madrid (Spain). Art. no publicado, corteía de los autores.
- Quenault, B. (2015). La vulnérabilité, un concept central de l'analyse des risques urbains en lien avec le changement climatique. *Les Annales de la Recherche Urbaine*, nº 110, Ville et vulnérabilités, 138-151. doi: 10.3406/aru.2015.3175. Recuperado de http://www.persee.fr/doc/aru_0180-930x_2015_num_110_1_3175
- Rakotoarisoa, M. M., Fleurant, C., Taibi, A. N., Rouan, M., Caillault, S., Razakamanana, T. & Ballouche, A. (2018). Un modèle multi-agents pour évaluer la vulnérabilité aux inondations: le cas des villages aux alentours du Fleuve Fiherenana (Madagascar). *Cybergeo: European Journal of Geography, Model Papers*, document 857. doi: 10.4000/cybergeo.29144. Recuperado de <http://journals.openedition.org/cybergeo/29144>
- Reghezza, M., Rufat, S., Djament-Tran, G., Le-Blanc, A. & Lhomme, S. (2012). What resilience is not: uses and abuses. *Cybergeo: European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage*, document 621. doi: 10.4000/cybergeo.25554. Recuperado de <https://journals.openedition.org/cybergeo/25554>
- Reguant-Álvarez, M. & Torrado-Fonseca, M. (2016). El método Delphi. *REIRE. Revista d'Innovació i Recerca en Educació*, vol. 9, nº 1, 87-102. doi: 10.1344/reire2016.9.1916
- Rufat, S. (2013). Spectroscopy of urban vulnerability. *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 103, nº 3, 505-525.
- Ruiz, M. (2012). Vulnerabilidad territorial frente a desastres naturales: el caso de la isla de Mallorca (Baleares, España). *Geofocus*, nº 12, 16-52.
- Sánchez-González, D. (2009). Geografía del envejecimiento vulnerable y su contexto ambiental en la ciudad de Granada: discapacidad, dependencia y exclusión social. *Cuadernos Geográficos*, vol. 45, nº 2, 107-135.
- Sánchez-González, D. & Egea-Jiménez, C. (2011). Enfoque de vulnerabilidad social para investigar las desventajas socioambientales. Su aplicación en el estudio de los adultos mayores. *Papeles de Población*, vol. 69, 151-185.
- Sánchez-González, D. & Chávez-Alvarado, R. (2016). Personas mayores con discapacidad afectadas por inundaciones en la ciudad de Monterrey, México. Análisis de su entorno físico-social. *Cuadernos Geográficos*, 55(2), 85-106. WOS: 000391389100004. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=17149048004>
- Santos, A., Tavares, A. O. & Emidio, A. (2014). Comparative tsunami vulnerability assessment of an urban area: An analysis of Setúbal city, Portugal. *Applied Geography*, vol. 55, 19-29.
- Schneiderbauer, S., Calliari, E., Eidsvig, U. & Hagenlocher, M. (2017). The most recent view of vulnerability. En Poljanšek, K., Marin-Ferrer, M., De-Groove, T. & Clark, I. (Eds.), *Science for disaster risk management 2017. Knowing better and losing less*, EUR 28034 (pp. 68-82). Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Subirats, J. & Martí-Costa, M. (Eds.) (2014). *Ciudades, vulnerabilidades y crisis en España*. Sevilla, España: Fundación Pública Andaluza, Centro de Estudios Andaluces, Consejería de la Presidencia, Junta de Andalucía.
- Tate, E. (2013). Uncertainty analysis for a social vulnerability index. *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 103, nº 3, 526-543.
- Thomas-Bohórquez J. E. (2013). Evaluación de la vulnerabilidad social ante amenazas naturales en Manzanillo (Colima). Un aporte de método. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, nº 81, 79-93.
- Tran, L. T., O'Neill, R. V. & Smith, E. R. (2010). Spatial pattern of environmental vulnerability in the Mid-Atlantic region, USA. *Applied Geography*, vol. 30, 191-202.
- Uitto, J. I. (1998). The geography of disaster vulnerability in megacities. A theoretical framework. *Applied Geography*, vol. 18, nº 1, 7-16.
- Weber, S., Sadoff, N., Zell, E. & de-Sherbinin, A. (2015). Policy-relevant indicators for mapping the vulnerability of urban populations to extreme heat events: A case study of Philadelphia. *Applied Geography*, vol. 63, 231-243.
- Wesenbeeck-van, C. F. A., Sonneveld, B. G. J. S. & Voortman, R. L. (2016). Localization and characterization of populations vulnerable to climate change: Two case studies in Sub-Saharan Africa. *Applied Geography*, vol. 66, 81-91.

- Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T. & Davis, I. (2006). *At risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters*. London & New York: Routledge, 2ª ed.
- Yáñez-Romo, V. & Muñoz-Parra, C. (2017). Construcción metodológica para determinar la vulnerabilidad socio-territorial frente a la pobreza. *Estudios Geográficos*, 282, 339-372. doi: 10.3989/estgeogr.201712

10. Agradecimientos

Estudio realizado dentro del Proyecto de Investigación “*Polución del aire, poblaciones vulnerables y salud: análisis de injusticias ambientales basados en geotecnologías*” (Ref. CSO2014-55535-R), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España. Se agradece a Ana Mellado San Gabino su valiosa labor en la obtención y preparación de datos. Asimismo se reconoce a los nueve expertos participantes en el método Delphi su inestimable contribución, así como a la Subdirección General de Estadística del Ayuntamiento de Madrid y al Instituto Nacional de Estadística de España su ayuda en la provisión de información estadística.

Los autores agradecen las críticas de los evaluadores anónimos para mejorar el artículo.

Sobre los autores

ANTONIO MORENO JIMÉNEZ, MARÍA JESÚS VIDAL DOMÍNGUEZ y PEDRO MARTÍNEZ SUÁREZ
Son respectivamente Catedrático, Profesora Titular y Dr. Investigador, miembros del Grupo de Investigación GEOTAPLAN (Geotecnologías, Análisis y Planificación Socio-Espacial) de la Universidad Autónoma de Madrid.

<https://www.uam.es/FyL/GEOTAPLAN>

11. Apéndice. Ponderación de indicadores y facetas del IVuSA-R

Acrónimo	Indicador	Peso	Faceta principal implicada	Peso
PcP1664_BI	Población entre 16 y 64 años (ambos incluidos) analfabeta, sin estudios o estudios de primer grado * 100 / Población entre 16 y 64 años (ambos incluidos)	0,5	EDU	0,116
PcP65m_BI	Población de 65 y más años analfabeta, sin estudios o estudios de primer grado * 100 / Población de 65 y más años	0,5		
PcP03	Población entre 0 y 3 años (ambos incluidos) * 100 / Población total (01/01/2012)	0,4	EDA	0,138
PcP65m	Población de 65 y más años * 100 / Población total	0,4		
PcP80m	Población de 80 y más años * 100 / Población total (01/01/2012)	0,2		
PcP_NoUE	Población nacida en un país europeo no miembro de la UE * 100 / Población total	3,7	INM	0,116
PcP_Africa	Población nacida en África * 100 / Población total	0,2		
PcP_AmeCSC	Población nacida en América Central, del Sur o Caribe * 100 / Población total	0,2		
PcP_Asia	Población nacida en Asia * 100 / Población total	0,2		
PcPEx_1Gra	Población de nacionalidad extranjera con estudios de primer grado * 100 / Población de nacionalidad extranjera	0,2		
PcP65m_NoP	Población soltera, separada, divorciada o viuda de 65 y más años * 100 / Población de 65 y más años	0,4	FAM	0,033
PcP65m_Sol	Población de 65 y más años que vive sola * 100 / Población de 65 y más años (01/01/2012)	0,6		
PcP_Inval	Población con invalidez permanente * 100 / Total de población en viviendas principales	1	INV	0,145
PcP_Paro	Población parada que ha trabajado o buscando 1 ^{er} empleo * 100 / Población entre 16 y 64 años (ambos incluidos)	0,255	LAB	0,099
PcP_Temp	Población trabajadora eventual o temporal * 100 / Población entre 16 y 64 años (ambos incluidos)	0,191		
PcP_IndCon	Artesanos y trabajadores de la industria manufacturera o la construcción * 100 / Población entre 16 y 64 años (ambos incluidos)	0,185		
PcP_Instal	Operadores de instalaciones y maquinaria o montadores * 100 / Población entre 16 y 64 años (ambos incluidos)	0,185		
PcP_Elem	Población con ocupaciones elementales * 100 / Población entre 16 y 64 años (ambos incluidos)	0,185		
RPC2013	Renta per cápita (2013) sobre población (01/01/2014)	1	RPC	0,132
PcV_NoCale	Viviendas principales sin calefacción * 100 / Total de viviendas principales	0,226	VIV	0,111
PcV_NoInte	Viviendas principales sin acceso a internet * 100 / Total de viviendas principales	0,136		
PcV_4NoAsc	Viviendas principales en edificios sin ascensor situadas en plantas 4 ^a y superiores * 100 / Total de viviendas principales	0,203		
PcV_EdDefi	Viviendas principales en edificio ruinoso, malo o deficiente * 100 / Total de viviendas principales	0,226		
PcV_NoAcce	Viviendas principales sin instalaciones de accesibilidad * 100 / Total de viviendas principales	0,209		
PcP_CSP8	Población residente a > 800 m en línea recta de cualquier centro de salud público (CSP) (04/2016) o consultorio de salud (05/2016) aunque sea de otro distrito * 100 / Población total (01/01/2015)	0,352	SAL	0,110
PcP_CEP25	Población residente a > 2500 m en línea recta de cualquier centro de especialidades público (CEP) (05/2015) aunque sea de otro distrito * 100 / Población total (01/01/2015)	0,352		
PcP_CSS10	Población residente a > 1000 m en línea recta del centro de servicios sociales (CSS) (05/2015) que presta cobertura asistencial a su barrio * 100 / Población total (01/01/2015)	0,295		

Fuente: elaboración propia.