

Estructura espacial regional y usos del suelo: una aplicación para Bogotá y 17 municipios.

Autores: Andres Dominguez; Hernán Enríquez & Nicolas Cuervo (versión 2020_08_13).

Resumen

El objetivo de este documento es analizar la ocupación y la distribución de usos del suelo en la región conformada por Bogotá y diecisiete municipios, a través de los niveles de accesibilidad como indicador de la estructura espacial. El indicador de accesibilidad utilizado permite superar dos retos: primero, se identifica la estructura espacial regional incluyendo a Bogotá como núcleo principal y los diecisiete municipios que guardan mayor relación con ella, lo que permite delimitar la discusión con respecto a si la estructura espacial regional es monocéntrica o policéntrica. Segundo, se amplía la tendencia utilizada en la literatura, en donde se identifican centros y subcentros de empleo para identificar densidades que aproximen la estructura espacial, en este caso se estudian las implicaciones en cuanto a su influencia en la ocupación del suelo y la distribución de usos del suelo. El análisis de usos del suelo se realiza mediante un modelo multinomial, cuya principal variable explicativa es el nivel de accesibilidad (la suma del número de empleos ponderada por la distancia). Entre los principales resultados se obtiene una mayor probabilidad de usos comerciales dentro de las áreas urbanas y un desplazamiento de la actividad industrial hacia las zonas rurales de algunos municipios de la sabana.

Palabras clave: Estructura espacial, Accesibilidad, Usos del suelo, Ordenamiento territorial, Economías de aglomeración.

Introducción

La estructura espacial regional se puede analizar desde el punto de vista morfológico a partir del concepto de regiones policéntricas. Desde una aproximación convencional, se busca establecer cómo las concentraciones de actividad económica se presentan en los núcleos urbanos de diferentes jerarquías y a partir de estas, se evalúan sus efectos en otras variables de interés como la conmutación, la especialización urbana, o los usos del suelo. Sin embargo, en un sentido más amplio del término, el cual se lleva a un entorno que trasciende la aparición de concentraciones de actividad económica al interior de una ciudad (policentrismo intraurbano), se busca establecer relaciones jerárquicas o de interacción entre dichos núcleos y los centros urbanos cercanos, abarcando el análisis más amplio (policentrismo interurbano) (Münter & Volgman, 2020).

Las regiones policéntricas pueden reflejar estructuras espaciales de actividad económica concentradas en su núcleo principal o con algún grado de diversificación en la localización de actividades. Esto guarda especial interés en la forma en la que se generan las interacciones entre los centros urbanos y su nivel de diversificación, lo que se traduce en la distribución de los usos del

suelo en la región de estudio. Mientras que se ha observado en los países desarrollados una evolución de regiones monocéntricas hacia el policentrismo (Salvati et al. 2016; Burger et al. 2011). Para el caso de regiones en países en desarrollo, por procesos de urbanización sin crecimiento económico (Jedwab & Vollrath, 2015), resulta de interés entender por qué pueden persistir regiones con estructuras monocéntricas o donde la transición al policentrismo ha sido más rápida pero menos funcional que en los países en desarrollo. En el presente documento se busca abordar este aspecto desde la perspectiva de los usos del suelo en diferentes localizaciones de la región metropolitana de Bogotá.

En este sentido, el presente documento estudia la relación entre la estructura espacial de la región compuesta por Bogotá y diecisiete municipios de Cundinamarca, y los usos del suelo presentes en diferentes zonas del área de estudio. El interés en este caso es identificar el patrón subyacente teniendo en cuenta la rápida urbanización sumada a efectos de desbordamiento desde la ciudad principal o núcleo.

Un enfoque cuantitativo reciente, cómo el que busca el presente documento, se orienta a la distribución las actividades residenciales y económicas en el espacio más que en la comparación absoluta de los centros y subcentros de actividad económica. Esta corriente se enfoca en técnicas espaciales y análisis de escenarios para la determinación de la importancia relativa de los centros (Hanssens, et al. 2014; Vasanen, 2012) y permite establecer en términos morfológicos, una evaluación de las condiciones de una región como un todo y los requerimientos que se necesitan para guiar la trayectoria de una región policéntrica a través de los determinantes identificados que explican los usos del suelo. Dado que el análisis empírico se realiza a nivel de manzanas (zonas urbanas) y lotes o terrenos (zonas rurales), los resultados tienen un importante grado de detalle.

La estimación de usos del suelo se desarrolla con la especificación de modelos multinomiales, cuya principal variable explicativa es el nivel de accesibilidad. Esta variable de accesibilidad se calcula como la suma del número de empleos en cada unidad espacial, ponderada por la distancia entre las unidades espaciales. Dentro de los principales resultados se obtiene una mayor probabilidad de usos comerciales dentro de las áreas urbanas y un desplazamiento de la actividad industrial hacia las zonas rurales de algunos municipios diferentes a Bogotá incluidos en el análisis.

Después de la presente introducción, el documento continúa con la revisión de literatura relacionada al tema de investigación. La siguiente sección presenta el modelo teórico que es la base del análisis empírico llevado a cabo en el documento. La cuarta sección presenta el análisis empírico tanto de estadística descriptiva, el cálculo de la variable de accesibilidad, la explicación de variables de control, y el modelo de estimación con la respectiva discusión de los resultados. La última sección presenta las principales conclusiones.

Revisión de Literatura

En las economías de mercado, el efecto combinado entre las fuerzas generadas por los mercados y las decisiones administrativas determinan las estructuras espaciales (Bertaud, 2018). El aprovechamiento de las ventajas de la localización y el crecimiento del mercado dan origen a estructuras regionales policéntricas desde lo morfológico y lo funcional. En la literatura se relaciona

lo morfológico con el equilibrio relativo de las ciudades en variables económicas o demográficas. El análisis basado en la funcionalidad de una región se interesa en la integración de la ciudad principal con las ciudades secundarias y de las ciudades secundarias entre sí (Zhao & Chen 2011; Burger et al. 2011; Xingjian et al. 2016).¹

Desde este punto de vista, el análisis de las densidades (de población, de espacio construido y de empleo) permite el análisis de patrones de urbanización (*sprawl*, *megaurbanización*) (Kraas et al. 2016) y las características del desarrollo económico regional (polos de desarrollo, *nursery cities*, gigantes urbanos) (Liu, Derudder & Wang, 2018; Garcia & Muñiz 2013; Rojas, Muñiz & García 2009). El principio de interés para el análisis regional radica en que las externalidades positivas y los arreglos institucionales hacen que cada componente urbano de la región sea más competitivo, socialmente más cohesivo y ambientalmente más sostenible (Hall & Pain, 2006, Parr, 2004). Al final, una región policéntrica es un sistema integrado que es más que la suma de sus partes (Meijers, 2005).

La literatura especializada ha identificado y clasificado las causas de la aglomeración por medio de conceptos como *technological spillovers*, *labour pooling* and *intermediate input linkages* (Marshall, 1890; Ellison et al., 2010), o como lo menciona Duranton & Puga (2004): *sharing*, *matching* and *learning effects*. Por tanto, los niveles significativos de concentración de actividad económica generan externalidades que son aprovechadas por las empresas, lo que se ve reflejado en incrementos en productividad, y en los salarios de los trabajadores (Rosenthal & Strange, 2003; Combes & Gobillon, 2015). En esta línea, existe evidencia que confirma la relación positiva entre los niveles de productividad y los niveles de concentración de actividad económica (Ciccone & Hall, 1996; Ciccone, 2002; Brulhart & Mathys, 2008; Melo & Noland., 2009; Combes et al., 2010; Morikawa, 2011). Como lo evidencia la literatura, esta relación se presenta tanto para diferentes sectores económicos como para diferentes niveles de agregación espacial.

La medición del policentrismo se fundamenta con el interés por evidenciar si existe un balance relativo entre los centros regionales, en términos de su importancia (Hall & Pain, 2016). Las aproximaciones empíricas se fundamentan en la medición de dos aspectos, la importancia de cada centro y cómo evaluar la importancia en cada centro (Liu, Derudder & Wang, 2017). Los métodos tradicionales de medición descansan en la comparación entre los distintos centros utilizando indicadores absolutos como tamaño de población o participación en el producto regional, o medidas relativas como el rango-tamaño (Möck & Küpper. 2020; Meijers & Burger, 2010).

La identificación de zonas con altas densidades y concentración de empleos permite analizar los patrones de centralidad o clusterización, compuestos por un centro de mayor relevancia y unas concentraciones de actividad económica de menor importancia que en algunos casos complementan el centro principal y en otros sustituyen sus funciones a una menor jerarquía. Un análisis de estas características orientado hacia la planeación busca el balance entre la localización de los puestos de trabajo y de los hogares la cual se puede incentivar mediante la provisión de servicios públicos en zonas específicas o por medio de acciones que busquen bien sea la

¹ También se puede asociar lo simbólico o lo político normativo, de manera estática o dinámica (Burger & Meijers, 2012; Green, 2007). Sin embargo, lograr una medición de gran escala utilizando los últimos dos atributos resulta complejo, bien por la obtención de medidas asociadas con interacciones sociales o relaciones de poder, las cuales son intangibles o difíciles de extrapolar entre centros.

densificación de centros existentes o fijen parámetros para que la expansión de estas (efecto contagio) no implique cambios de uso que se consideren indeseados.

La concentración de actividades económicas en zonas específicas de las áreas urbanas (centralidades) implica una distribución desigual de los usos del suelo en el espacio. La disponibilidad a pagar por el suelo que está asociada a las diferentes actividades es el mecanismo por el cual se resuelve la competencia por la cercanía a las centralidades. En este sentido, como argumenta Bertaud (2018), en los entornos urbanos los mercados actúan a través de los precios del suelo. Localizaciones en donde el precio del suelo es elevado (es decir, demanda elevada, o suelo escaso) hacen que el suelo se utilice de manera intensiva (por ejemplo, edificios con mayor número de pisos), mientras que en localizaciones con precios del suelo menos elevados se hace un uso más extensivo y, por tanto, la densidad de las construcciones será menor. Lo que genera tensiones en los usos del suelo, por la competencia entre actividades económicas. Esta competencia se realiza para un bien cuya oferta y demanda son particulares si se comparan con otros bienes y servicios de una economía. En términos particulares, cada lote de suelo tiene una localización fija que se encuentra asociada a características únicas en términos de calidad del suelo, pendiente, altitud, accesibilidad, etc. (Koomen & Stillwell, 2007; Combes, P., Mayer, T. & Thisse, J., 2008; Jaramillo, 2009; Combes & Gobillon, 2015, entre otros autores).

Las regiones policéntricas guardan información de su evolución, a partir de la cual se pueden responder interrogantes relacionados con el tamaño de los centros, la interconexión funcional de estos, la escala regional del fenómeno policéntrico, entre otros (Münter & Volgman, 2020). Si bien las condiciones originarias de la región se tienden a mantener en el caso de los tamaños relativos de población o la importancia económica, la aparición y consolidación de subcentros introduce cambios estructurales permitiendo que se suplan funciones locales de los centros dominantes en nuevos sectores (conformando ciudades de corta distancia, regiones metropolitanas o megaregiones).

Las regiones policéntricas desarrollan un patrón de alta interconexión a partir de un núcleo central. Además, en un estado avanzado de formación, los centros no son fácilmente distinguibles en lo físico como si en lo administrativo (Wang et al, 2020; Kloosterman & Musterd, 2001). Esto modifica los usos del suelo originales como respuesta a una mayor incidencia económica o a una especialización regional, entre otros. Recientemente, se ha orientado el análisis de centros y subcentros en aparición y relación funcional al interior de la ciudad núcleo más importante, a partir del desarrollo teórico de las economías de aglomeración (Gordon & Richardson, 1996).

En América Latina la transición hacia el policentrismo ha sido acelerada con la particularidad que las actividades se concentran al interior de los centros urbanos principales dando origen a subcentros de empleo al interior de las ciudades de mayor tamaño y una menor formación de nodos en la periferia metropolitana (Fernández-Maldonado, et al. 2014). Regiones relevantes en el contexto latinoamericano como la de Santiago de Chile (Truffello & Hidalgo, 2013) o ciudad de Buenos Aires (Usach, Garrido-Yserte & Gallo-Rivera, 2017) y sus respectivos nodos, presentan patrones morfológicos que han evolucionado de una región fragmentada o funcionalmente dispersa a una región policéntrica tanto a escala intra como interurbana.

En términos específicos, el presente documento busca explicar la distribución de los usos del suelo en Bogotá y 17 municipios aledaños a través de varios determinantes, dando principal importancia

al nivel de accesibilidad como expresión de la estructura espacial regional. El análisis se desglosa para varios usos, buscando verificar si las actividades económicas asociadas al comercio y los servicios generalmente tienen mayores incentivos para localizarse cerca de los sitios con mayores niveles de accesibilidad ejerciendo una competencia por el uso del suelo, por ejemplo, con actividades asociadas a la industria o al uso residencial que se localizarían en zonas con accesibilidades medias o bajas. El presente trabajo retoma así una característica, señalada por Verburg et al. (2004), de los modelos descriptivos de cambios de uso del suelo los cuales parten desde el punto de vista de un terrateniente que obtiene rentas del suelo al permitir que otro agente lo ocupe con el objetivo de maximizar los retornos esperados o la utilidad derivada del suelo.

La perspectiva adoptada se relaciona con investigaciones sobre el efecto de infraestructura de transporte en el valor y usos del suelo. Como lo señala Eliasson, et al. (2020), las inversiones de infraestructura de transporte generan cambios en los valores del suelo, lo que se refleja a su vez en el cambio en los usos del suelo. Por otro lado, Zheng, et al (2016) investiga el impacto que han tenido las estaciones de metro en las amenidades de los barrios cercanos, puesto que al construir la estación se incrementa el número de restaurantes y la diversidad de restaurantes en las zonas cercanas. Por su parte, Bowes & Ihlandfeldt (2001) muestran como las estaciones de trenes no solamente incrementan el valor de las propiedades, sino que también atraen actividades económicas de comercio al por menor, lo que significan cambios en los usos del suelo. El análisis de los usos del suelo tiene también aportes desde otra escala más amplia, por ejemplo, Xu, McNamara, Wu & Dong (2013) analizan usos asociados a asentamientos, huertas, carreteras, pastizales, entre otros, en el periodo de 1993-2008, para una provincia de Beijín. Los autores identifican los determinantes y los cambios de uso del suelo a través de la estimación de un modelo logístico multinomial.

Marco Teórico

El objetivo de esta sección es abordar los principales aspectos teóricos bajo los cuales se puede analizar el patrón funcional de una región compuesta por ciudades que buscan aprovechar los beneficios de la aglomeración y menores costos de acceso a los mercados, bien por la vía tradicional del transporte o por la vía de los costos de acceso. Para ello, se presentan los principales elementos teóricos para analizar efectos policéntricos en dos escalas. En la primera, se aborda la naturaleza de las fuerzas de aglomeración, la cual propicia la generación de un centro o centros de actividad, con lo que se pueden configurar los principales aspectos de la estructura urbana.

Entre los aportes teóricos más importantes para analizar las estructuras espaciales de las ciudades se encuentran los realizados por Alonso (1964), Muth (1969) y Mills (1967). Los autores plantearon cómo se concretaban las localizaciones tanto de las empresas como de las unidades residenciales partiendo de la influencia gravitacional que puede generar un centro de actividad económica (*Central Business District*, en adelante CBD). Estos modelos, cuya influencia principal es el modelo de Von Thunen (1827) parten de la localización determinística del CBD y la distancia desde cualquier punto del área urbana es una variable fundamental para explicar las disposiciones a pagar que tienen los agentes por el uso del suelo (Fujita & Thisse, 2002).

A partir de estos desarrollos teóricos de Alonso (1964), Muth (1969) y Mills (1967), Fujita & Ogawa (1982) desarrollaron un modelo lineal en donde se evita suponer un CBD determinístico. Los autores incorporan las externalidades positivas generadas por las economías de aglomeración como principal generador de concentraciones de actividad económica. Las externalidades positivas permiten que las empresas sean más productivas y este incentivo posibilita la existencia de un CBD, en principio de baja jerarquía, pero a medida que la concentración de actividad económica se vuelve más importante se va definiendo, de manera progresiva, la estructura espacial de los entornos urbanos. Por tanto, el CBD influye directamente en las rentas del suelo, puesto que la competencia por el suelo cercano al CBD adquiere condiciones de escasez.

Una modificación al modelo de Fujita & Ogawa (1982) fue realizada por Lucas & Rossi-Hansberg (2002). En este caso los autores desarrollan un modelo circular en donde tanto las empresas como los hogares compiten por el uso del suelo. Las economías de aglomeración generan incentivos para que las empresas se concentren en determinados lugares del espacio geográfico y la competencia por el uso del suelo cercano a estas localizaciones desplaza a la actividad residencial. Para los hogares, la principal variable está relacionada con los costos de desplazamiento que tienen que asumir los trabajadores hasta su lugar de trabajo. Por tanto, las empresas tienen incentivos para localizarse cerca a otras empresas, mientras que los hogares buscan localizaciones residenciales en donde se minimice el costo de desplazamiento. De esta manera, las rentas del suelo y los salarios pagados a los trabajadores hacen que las empresas y los hogares tomen decisiones de localización.

En términos formales, las empresas, para producir bienes y servicios, requieren suelo y trabajadores. Dado que la productividad de las empresas tiene una relación positiva con los niveles de actividad económica que se concentran a su alrededor, la producción por unidad de suelo en la localización s , $x(s)$, se expresa de la siguiente forma: $x(s) = A z_s^\gamma n^\alpha$.

En esta especificación A es una constante de productividad, z_s representa los efectos de aglomeración espacial en los niveles de producción de la localización s . Este efecto de aglomeración es una variable que se calcula sumando el empleo de las localizaciones s y ponderado por la distancia a cada una de las localizaciones. También es necesario resaltar que la interpretación de esta variable se hace en términos de accesibilidad al empleo en términos de concentraciones de actividad económica. El número de trabajadores de cada empresa está representado por n y el parámetro α es menor que uno.

El beneficio de la empresa por unidad de suelo en la localización s se representa formalmente como sigue: $\pi(s) = A z_s^\gamma n^\alpha - w(s)n$. En donde $w(s)$ representa el salario que pueden pagar las empresas en la localización s . De esta manera cada empresa elige una cantidad de empleo n que le permita maximizar la función de beneficios. Las condiciones de primer orden permiten obtener $n = \hat{n}(w, z)$ y $q = \hat{q}(w, z)$. Es decir que, dados los salarios w y los niveles de aglomeración, o accesibilidad, z se obtienen las disponibilidades a pagar por cada unidad de suelo.

En el caso de la localización residencial de los hogares y trabajadores, se plantea una función de utilidad que depende de un bien de consumo (c) y de la cantidad de suelo residencial (l): $U(c, l) = c^\beta l^{1-\beta}$. El costo de transporte que el trabajador debe asumir para desplazarse desde el lugar de residencia, r , hasta el lugar de trabajo, s , se describe formalmente como: $e^{-\kappa|r-s|}$. De tal manera que el salario que recibe el trabajador se multiplica por el costo de transporte: $w(r) =$

$e^{-\kappa|r-s|}w(s)$. De esta manera es como el modelo condiciona a los trabajadores para que tomen decisiones de localización residencial.

Por tanto, en equilibrio, el suelo se asigna para localizar actividad económica y actividad residencial. El modelo permite obtener gradientes de renta, esto significa que, en las áreas con mayor densidad de actividad económica, los precios del suelo son más altos y se pueden pagar mayores salarios. Por otro lado, en áreas residenciales más cercanas a amenidades o externalidades positivas donde los salarios siguen siendo altos, los precios del suelo residencial serán también altos. La distribución espacial de usos de suelo (económico y residencial) dependerá de cuál de las curvas de disponibilidades a pagar domina.

Por tanto, el modelo teórico señala que, en el caso donde el gradiente de actividad económica domina, se generarán zonas de uso económico exclusivo. Por otro lado, cuando el gradiente asociado a la actividad residencial domina, se generarán zonas de uso residencial exclusivo. Finalmente, cuando los gradientes son similares, se generarán zonas de usos mixtos. La estructura urbana en este modelo no necesariamente predice que las áreas residenciales se concentran en los bordes de la ciudad y que las zonas de negocio se concentren en el centro como en las estructuras regionales monocéntricas, sino que permite la posibilidad de que existan diversos centros de actividad y áreas de combinación de usos económicos y residenciales. De hecho, en varias investigaciones se ha mostrado evidencia de cómo estructuras monocéntricas se han transformado en estructuras policéntricas o dispersas (Anas, Arnott & Small, 1998; Muñiz & Garcia-López, 2010; Kloosterman & Musterd, 2001).

Hechos estilizados para Bogotá y la Región

En términos empíricos, el análisis regional que abarca el presente documento incluye a Bogotá, que es la ciudad más importante de Colombia (genera aproximadamente el 25% del PIB, según cifras del año 2017, y concentra el 16% de la población, según el censo de población del año 2018), y 17 municipios vecinos con los que se ha mostrado, que guardan una relación de conmutación a diversos niveles: Bojacá, Cajicá, Chía, Cota, Facatativá, Funza, Gachancipá, La Calera, Madrid, Mosquera, Soacha, Sibaté, Sopó, Tabio, Tenjo, Tocancipá y Zipaquirá. El crecimiento urbano y la red de conectividad regional ha estado limitada a la conexión con la ciudad principal, lo cual ha generado dos fenómenos de interés para el análisis. En primer lugar, se tienen municipios conurbados físicamente con Bogotá o entre municipios periféricos esa como es el caso de Soacha Bogotá y Funza – Mosquera.

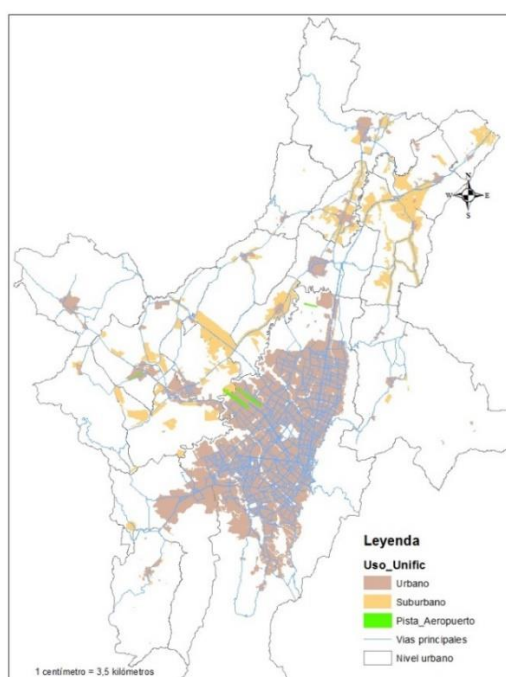
En segundo lugar, la red vial conecta el nodo principal, en este caso Bogotá, lo que limita en algunos casos las vinculaciones entre municipios. Aunque esto no implica el paso por la ciudad para lograr conectividad regional, si determina patrones de movilidad en la región.

Es necesario mencionar que la región de estudio no está organizada ni planeada de manera conjunta, por lo que la mayor parte de los fenómenos observados en el territorio obedecen en su mayor medida a dinámicas generadas por la influencia económica de Bogotá y los intereses locales de atracción de actividades económicas y residenciales. Esto da como resultado un proceso de crecimiento urbano heterogéneo y fragmentado, propenso a generar fenómenos de segregación

socioespacial y a la especialización funcional de los nodos en determinadas actividades como el mercado inmobiliario o la industria, aunque la naturaleza de la interdependencia con la capital como principal mercado ha permitido que se pase de una orientación planeada a una competencia desordenada por ubicaciones estratégicas como lo son los ejes viales.

En el Mapa 1 se muestra la mancha urbana de la región, en donde se puede observar cómo la funcionalidad se expresa en la ocupación del territorio con criterios de accesibilidad a los ejes viales y a partir de estos a Bogotá. Cabe destacar, además, como se expresan los intereses particulares en los procesos de urbanización en donde se prioriza el suelo suburbano en el occidente y norte de la región más que al sur o al interior de Bogotá.

Mapa 1. Territorio funcional para la ocupación.



Fuente: Elaboración propia con información de SDP-IDOM

La población en la ciudad de Bogotá presentó un crecimiento de 4'947,890 en el Censo de 1993 a 6'707,338 habitantes en el Censo de 2005. Lo que representa un 38%. Mientras que los datos del Censo Poblacional de 2018 registran una población cercana a los 7'421,566, lo cual representa un crecimiento del 10% con respecto al año 2005. El área urbana de Bogotá pasó de 28.153 hectáreas en 1991 a 38.683 en 2005, lo que representa un crecimiento de 37%. Mientras que el área urbana en 2018 fue de 41.696 hectáreas, lo que representa un crecimiento de 7,8% entre 2005 y 2018. En conclusión, según información del Censo Nacional de Población y Vivienda (CNPV, 2018) en Bogotá habitan 7'421,566 personas, mientras que en los 17 municipios de Cundinamarca habitan 1'712,578. Para un total de 9'125,144 habitantes.

La distribución de la actividad económica se puede evidenciar con el destino de los viajes con motivo ir a trabajar que se registran en las encuestas de movilidad, como lo hace Estupiñan, et al. (2017).

El Mapa A1 en la sección de Anexos muestra como al representar el destino de los viajes por hectárea se tiene un número importante de zonas en Bogotá con densidad de viajes al trabajo, así como en los municipios de Soacha, Cota y Tocancipá. Sin embargo, los viajes al trabajo no son un indicador suficiente de la estructura económica regional en el espacio, una de las razones es porque las encuestas de movilidad no tienen este objetivo.

El análisis empírico de la estructura urbana de Bogotá D.C. se ha abordado en algunos estudios, así como los efectos económicos en las ciudades de Colombia desde una perspectiva regional. Por ejemplo, Dowall & Treffeisen (1991), identificaron el centro y los subcentros de empleo en Bogotá. Adicionalmente, utilizando la metodología propuesta por Muñiz, García-López & Galindo (2008) y Muñiz & García-López (2010), Avendaño, Enríquez & Olarte (2014) identifican el centro y los subcentros de empleo en donde se concentra la actividad económica de Bogotá. En ese trabajo, se utilizan registros de empleo del año 2005 proporcionados por la Secretaría de Planeación Distrital a nivel de 607 sectores censales. Los autores utilizan estadísticas descriptivas para identificar el centro y los subcentros de actividad económica. Específicamente, identifican aquellos sectores censales en donde la densidad de empleo es mayor o igual a la densidad promedio de la ciudad y, además, el nivel de empleo es mayor o igual al 1% del empleo total de la ciudad. El CDN, o Centro Distrital de Negocios, lo identifican geográficamente en el centro tradicional de Bogotá. También se encuentra evidencia de la existencia de los siguientes subcentros: San José, Álamos (al occidente, cerca al Aeropuerto el Dorado), y los otros tres hacia el norte de la ciudad: Avenida Chile, Calle 100 y Calle 127.

En términos de usos de suelo, es posible calcular el uso predominante en cada manzana, terreno o lote del área de estudio, utilizando el porcentaje de metros cuadrados construidos por uso que se registra en las bases catastrales del año 2017. En la Tabla 1 se muestra la distribución de los usos del suelo en la región para varias categorías, principalmente cinco: Residencial, Comercio, Industria, Dotacional y Agrícola.

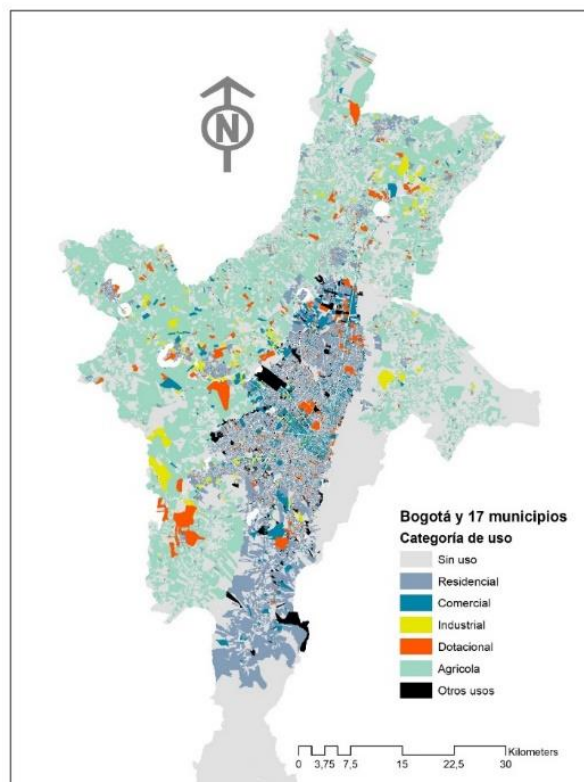
Tabla 1 – Número de unidades espaciales por uso predominante del suelo en Bogotá y 17 municipios.

Uso	Zona		Total
	0 - Rural	1 - Urbano	
Sin uso	36,453	647	37,100
Residencial	18,162	41,605	59,767
Comercio	873	3,528	4,401
Industria	554	162	716
Dotacional	942	1,565	2,507
Agrícola	21,606	4	21,610
Otros usos	160	3,763	3,923
Urbanizable	37	2	39
Urbanizado	18	1	19
No urbanizable	8	2	10
TOTAL	78,813	51,279	130,092

Fuente: Cálculos propios con información de IGAC y Catastro Distrital de Bogotá, año 2017.

El Mapa 2 muestra la distribución de los usos del suelo en el área de estudio. La categoría sin uso indica que en la unidad espacial no hay metros cuadrados construidos de algún uso. El color gris identifica a las unidades espaciales con metros cuadrados construidos residenciales, el color azul es el uso comercial, el color amarillo es el uso industrial y el color naranja el uso dotacional. La Tabla 1, asociada a la información cartográfica, muestra el número de unidades espaciales por uso en la región de estudio controlando por la variable zona que toma el valor de 1 en áreas urbanas y 0 en áreas rurales.

Mapa 2 – Uso predominante del suelo en Bogotá y 17 municipios.



Fuente: Cálculos propios con información de IGAC y Catastro Distrital de Bogotá.

Información y metodología

El área de estudio del presente documento incluye a Bogotá y 17 municipios aledaños (Mapa 3). La información utilizada proviene de la Encuesta de Establecimientos Económicos de Bogotá y la Región del año 2017 (en adelante EEEBR (2017) llevada a cabo por el Observatorio de Dinámicas Urbano Regionales de la Secretaría Distrital de Planeación de Bogotá y de información catastral la cual es producida para Bogotá por la Unidad Administrativa Especial de Catastro y para los otros municipios por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

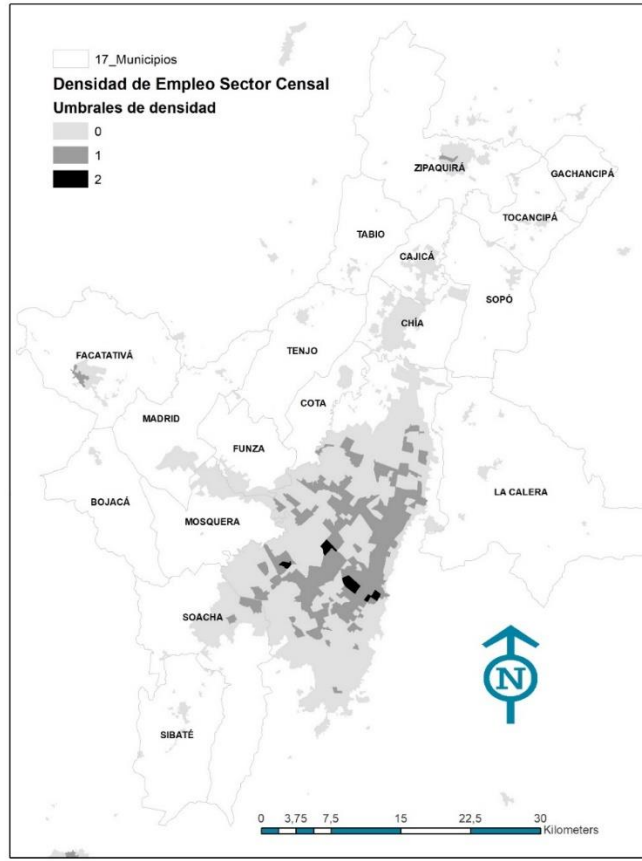
La EEEBR (2017) es el insumo para calcular el indicador de accesibilidad al empleo, el cual es un insumo para el análisis de los determinantes de los usos del suelo en diferentes sectores del área

metropolitana. El análisis de usos del suelo utiliza la información catastral, el indicador de accesibilidad e información complementaria (distancia a vías principales, categoría normativa del suelo, zonas de reserva) para estudiar los determinantes del uso, sus diferencias para localizaciones con características diferentes y explorar las posibles evoluciones de los usos en la región de estudio. Esta sección presenta los principales elementos metodológicos de la investigación y la siguiente muestra los resultados del análisis de usos del suelo.

El indicador de accesibilidad utilizado en este trabajo difiere de las técnicas tradicionales que aplican criterios estadísticos para identificar aquellas unidades espaciales con mayor número y densidad de empleo (centros y subcentros de empleo). Esta alternativa no se considera pues tiene la limitación de no tomar en cuenta el efecto espacial subyacente. Es decir que, tanto el centro de empleo como los subcentros de empleo se encuentran, en la mayoría de los casos, rodeados de unidades espaciales con importantes concentraciones de actividad económica.

Para comparar los resultados del indicador de accesibilidad con la identificación de centros y subcentros se replicó la metodología de Avendaño et al. (2008) para el área metropolitana de Bogotá con los datos registrados en la EEEBR (2017). Esta registra 1'541.088 empleos y una densidad de empleo promedio a nivel de sector censal de 33,7 empleos por hectárea. En el Mapa 3 se muestran los sectores censales de que tienen densidades superiores al promedio (categoría 1) y aquellos que, además de superar la densidad promedio, tienen un porcentaje de empleo superior al 0,8% (categoría 2), los cuales son catalogados por esta metodología como centralidades de empleo. Solo hay un sector censal que supera el 1% y es Corabastos (1,04%). Los otros sectores censales que cumplen con estas dos condiciones están sobre el corredor vial que conecta el centro tradicional (CDN) con el Aeropuerto el Dorado.

Mapa 3- Densidades de empleo en Bogotá y 17 municipios, 2017.



Fuente: Cálculos propios con información de la EEEBR (2017).

El indicador de accesibilidad que se usa en el presente trabajo se construye siguiendo el modelo de Lucas & Rossi-Hansberg (2002) y el aporte de autores como Holmes & Sieg (2015) y Ahlfeldt, et al. (2015). El indicador Z_j representa el nivel de aglomeración económica, o accesibilidad al empleo, asociado a la unidad espacial j proveniente del empleo ubicado en la misma zona y además de todas las otras localizaciones que hacen parte del área de estudio. En términos formales se tiene que:

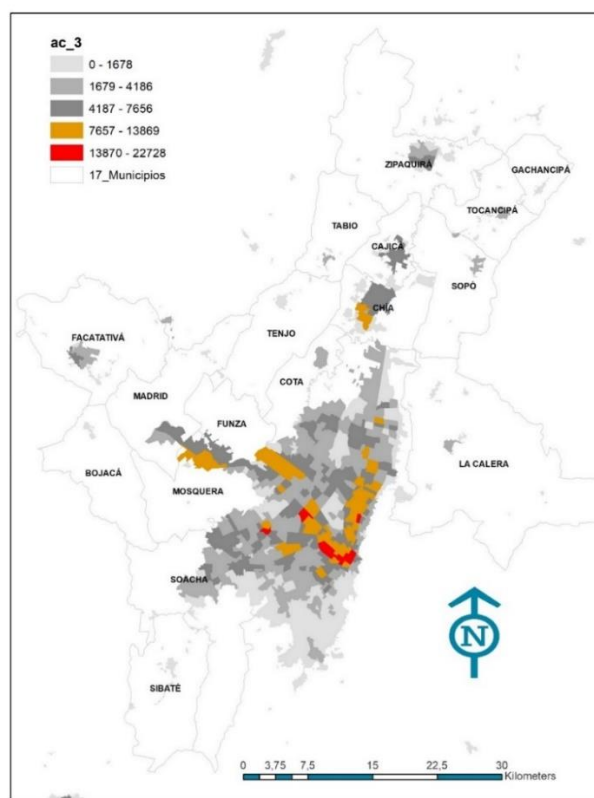
$$Z_j = \sum_{k=1}^J e^{-\delta m_j^k} \tilde{E}_k ; \delta \geq 0$$

En donde $\tilde{E}_k$ representa la cantidad de empleo en una localización k , m_j^k es la distancia entre diferentes unidades espaciales j y k y el parámetro δ define la velocidad en la cual el efecto de la aglomeración espacial declina con la distancia (en la literatura se conoce como parámetro de fricción espacial).

Es necesario tener en cuenta que los efectos espaciales quedan incorporados en el cálculo de esta variable puesto que, además de los niveles de empleo, un insumo principal es la matriz de origen destino que tiene en sus filas y columnas las distancias entre las unidades espaciales de análisis. Por lo tanto, el parámetro de fricción $\delta > 0$ y las distancias entre las unidades espaciales son fundamentales debido a que da cuenta de los costos de transporte en la región de estudio. Cuando

estas medidas se modifican las sumatorias cambian, permitiendo que esta variable fundamental en la estructura regional se modifique. Es posible evaluar el alcance del efecto espacial o el alcance de los niveles de accesibilidad entre unidades espaciales con diferentes valores del parámetro de fricción. En el ejercicio econométrico, el parámetro de fricción adecuado dependerá de los estadísticos de ajuste calculados para los modelos de regresión que se requiera estimar. Es necesario tener en cuenta que un parámetro de fricción igual a 0.5 o 1 permite que el alcance de la aglomeración sea mayor en la cobertura de estudio. Mientras que cuando el parámetro es mayor, por ejemplo, igual a 5, el efecto tiene un comportamiento de menor alcance. El Mapa 4 muestra el cálculo de la accesibilidad con un parámetro de fricción δ igual a 3.²

Mapa 4- Indicador de accesibilidad con parámetro de fricción igual a 3.



Fuente: Cálculos propios con información de la EEEBR (2017).

El patrón de accesibilidad regional muestra una concentración del empleo y por ende la actividad económica en el espacio regional. Los valores más altos del indicador se encuentran en Bogotá como ciudad principal e incluyen la mayor parte de las aglomeraciones (subcentros) que se han encontrado previamente en la literatura. Específicamente, las zonas de los centros empresariales, industriales, las zonas de comercio y el aeropuerto, son identificadas.

Adicionalmente, este indicador permite identificar dos patrones: uno observado y otro no observado. En el primero, se logra identificar cómo en 2 de los 17 municipios se presenta un valor

² En el Mapa A2 del Anexo se presentan resultados del indicador usando niveles de fricción alternativos.

importante del indicador, el cual, comparado a lo observado al interior de Bogotá, suma relevancia a dichos centros urbanos. Por un lado, se tiene al municipio de Chía, en el cual se localizan actividades asociadas con el uso del suelo comercial y dotacional. Por otro lado, se presenta el municipio de Mosquera con una predominancia al uso de suelo industrial. Los dos municipios guardan características diferenciadas entre sí, adicional a la predominancia de usos mencionada.

El patrón no observado de acuerdo con los valores más bajos del indicador se encuentra para los municipios de Soacha y Tocancipá, los cuales han concentrado la industria de la región, pero no exhiben la accesibilidad que pueda llevarlos a ser considerados como centros urbanos de la misma importancia como los mencionados anteriormente, en términos de actividad económica.

En resumen, la estructura espacial de la región con Bogotá como el principal núcleo urbano, contiene un grupo de zonas de concentración de actividad económica de mayor predominancia en empleo, aunque esta también abarca municipios cercanos. Sin embargo, se logra distinguir como esta distribución de concentración de actividad económica no abarca a toda la ciudad, ni a todos los municipios. En algunos de estos últimos es débil o prácticamente inexistente, como en el caso de Gachancipá, Tabio, Tenjo, Bojacá y Sibaté.

Los valores obtenidos por este método alimentan el análisis de los factores determinantes de los usos del suelo. En la literatura especializada sobre usos del suelo se encuentra la aplicación de modelos de elección discreta como una herramienta para explicar elecciones entre alternativas mutuamente excluyentes (dell’Olio, Cordera & Ibeas, 2018). Este tipo de modelos econométricos con variable dependiente de más de dos alternativas se estiman generalmente por máxima verosimilitud. En el caso particular del presente documento, la variable dependiente representa las alternativas entre usos del suelo. Desde el punto de vista de la interpretación económica, se plantea que la categoría de uso del suelo que efectivamente se realiza, es la que está relacionada con un mayor nivel de utilidad o de beneficios, en comparación al resto de alternativas.

Para formalizar el modelo, esta aproximación metodológica explica la probabilidad de que un uso del suelo se materialice teniendo como referencia el resto de las posibilidades de usos (Koomen & Stillwell, 2007). La especificación del modelo toma la siguiente forma:

$$P_{iu} = \Pr[y_i = u] = \frac{e^{(\beta_1 * x_{i1} + \beta_2 * x_{i2} + \dots + \beta_k * x_{ik})}}{\sum_U e^{(\beta_1 * x_{i1} + \beta_2 * x_{i2} + \dots + \beta_k * x_{ik})}} \quad u = 1, \dots, U$$

En donde la variable dependiente P_{iu} representa la probabilidad de que la unidad espacial i tenga un uso del suelo u ; e representa la base del logaritmo natural; x_{ik} representa las diferentes variables explicativas que se usan para modelar la conveniencia de la unidad espacial i para alojar el uso u ; por último, los valores β son los parámetros que ajustan el modelo.

El modelo estimado con esta especificación para el área metropolitana de Bogotá permite obtener las probabilidades de que un uso del suelo se localice en un área específica de la estructura espacial regional teniendo en cuenta características espaciales como las condiciones de accesibilidad, distancia a las vías principales y las siguientes variables de control adicionales: variables binarias para zonas de expansión y zonas suburbanas (las cuales permiten considerar el potencial crecimiento de la huella urbana de cada municipio); restricciones con respecto a áreas de páramos, zonas de protección forestal y cuerpos de agua, para tener en cuenta las principales restricciones al

crecimiento de las áreas urbanas de los municipios; la variable Urbano/Rural que toma el valor de 1 en áreas urbanas y 0 en el caso de áreas rurales; y las coordenadas (X, Y) que se incluyen para controlar efectos espaciales no observados.

En la revisión de otras especificaciones del modelo econométrico se identificó a los modelos anidados como una posible alternativa para explicar variables dependientes de múltiples categorías. Sin embargo, la estimación de este tipo de modelos requiere establecer algunas condiciones. Por ejemplo, en la estimación de modos de transporte es posible identificar modos de transporte públicos y privados, lo cual define las ramificaciones (*nests*) de elección discreta entre alternativas excluyentes. También se requiere que las variables explicativas varíen entre alternativas (Cameron y Trivedi, 2008). En el caso de la modelación de usos del suelo, es difícil garantizar estas dos condiciones, puesto que en el caso particular se tienen usos asociados a residencial, comercial, industria dotacional y agrícola y tanto la variable de accesibilidad, como las variables de control aplican de manera transversal en las categorías de usos del suelo. Por tanto, se optó por estimar modelos multinomiales, en donde la conveniencia de que una unidad espacial aloje un uso específico del suelo puede ser explicada por diferentes factores como las características físicas del suelo, accesibilidad (que implica la incorporación del contexto espacial subyacente), políticas de ordenamiento que restringen o incentivan la localización de actividades económicas o residenciales (Koomen & Stillwell, 2007).

Usos de suelo y estructura espacial regional

Esta sección muestra los resultados de un modelo que estima los usos de suelo en la estructura espacial identificada mediante el indicador de accesibilidad. Los resultados permiten determinar la relación de funcionalidad regional entre Bogotá y sus subcentros y los centros de actividad encontrados para los municipios. Al final de la sección se discute la tendencia espacial de los datos a la luz del patrón espacial observado.

La Tabla 2 muestra los resultados de la estimación de tres modelos con la especificación logit multinomial para estimar la probabilidad de usos del suelo de acuerdo con un conjunto de variables explicativas. Las categorías de la variable dependiente coinciden con las más relevantes de la primera columna en la Tabla 1 y son: residencial, comercial, industrial, dotacional y agrícola. Con respecto a la interpretación de las estimaciones, los coeficientes asociados a cada variable indican la mayor o menor probabilidad del uso correspondiente a la categoría indicada con respecto al uso residencial (categoría base). Este uso residencial como categoría base es el más frecuente. Además, la escogencia de la categoría base no modifica el cálculo de probabilidades (que se muestra posteriormente) a partir de las cuales se desarrolla el análisis espacial de los resultados.

Es necesario señalar que los modelos de este tipo deben cumplir con una prueba de alternativas irrelevantes. Es decir que al excluir una de las categorías en la variable dependiente no debería generar cambios estadísticamente significativos en los coeficientes estimados. Por tanto, se realizó una prueba de Small-Hsiao en donde, si la hipótesis nula es rechazada, significa que al eliminar una categoría de la variable dependiente no es independiente de las otras. El resultado de estimaciones en donde al excluir una categoría y comparar los coeficientes del modelo no restringido se obtiene

que las diferencias entre los coeficientes de los dos modelos no son significativas. De tal manera que no es posible rechazar la hipótesis nula y se asume que las alternativas son independientes (ver resultado de la prueba en la Tabla A1 en la sección de Anexos).

Como se puede observar (Tabla 2) las estimaciones para tres indicadores de accesibilidad espacial muestran la robustez de los resultados respecto a diferentes parámetros de fricción. El primero, cuando el parámetro de fricción espacial es igual a 0.5, el segundo cuando este parámetro es igual a 2, y el tercero cuando la fricción es muy alta con parámetro de 5 (ver mapas en Anexo A2). Los resultados muestran que el coeficiente asociado al indicador de aglomeración es positivo en los tres casos y su valor disminuye a medida que se incrementa el parámetro de fricción, lo que guarda coherencia con la intuición y la teoría enunciadas en este documento. Además, tal como lo muestran los estadísticos de ajuste de cada uno de los modelos en la parte inferior de la Tabla 2, no existe una diferencia abrumadora.

Tabla 2 – Resultados estimación del Modelo Multinomial de usos del suelo

	log(access_0_5)				log(access_2)				log(access_5)			
	Com.	Ind.	Dot.	Agr.	Com.	Ind.	Dot.	Agr.	Com.	Ind.	Dot.	Agr.
Log(acc)	1.06***	-0.03	-0.02	-0.38***	0.95***	-0.19***	-0.03	-0.22***	0.66***	-0.10***	-0.04**	-0.15***
Log(dvias)	-0.46***	0.16***	-0.04*	0.34***	-0.50***	0.18***	-0.04*	0.34***	-0.54***	0.18***	-0.04*	0.34***
Urbano/Rural	-2.08***	-1.68***	-0.29***	-8.38***	-0.54***	-1.48***	-0.31***	-9.13***	0.24***	-1.68***	-0.32***	-9.36***
Expansión	-0.18	-1.08***	0.04	-1.11***	0.83***	-1.06***	0.02	-1.34***	0.87***	-1.14***	0.00	-1.46***
Suburbano	-0.01	2.14***	-0.45***	-0.38***	0.10	2.18***	-0.45***	-0.51***	0.00	2.16***	-0.45***	-0.53***
Reserv. Forestal	0.32***	-1.84***	0.30***	0.18***	0.71***	-1.89***	0.30***	0.22***	0.47***	-1.86***	0.29***	0.25***
Reserv. Hídrica	-0.32***	-0.11	-0.21*	0.13	-0.19*	-0.08	-0.21*	-0.14	-0.32***	-0.10	-0.21*	-0.19*
coord_x	0.00***	0.00***	0.00	0.00***	0.00***	0.00***	0.00	0.00***	0.00***	0.00***	0.00	0.00***
coord_y	0.00***	0.00**	0.00	0.00***	0.00***	0.00	0.00	0.00***	0.00***	0.00	0.00	0.00***
_cons	-11.15***	0.20	-2.63***	1.84***	-9.02***	0.81*	-2.63***	0.42***	-7.24***	0.30	-2.54***	-0.12
Number of obs.	88,987				88,987				88,986			
LR chi2(44)	51,325				50,455				49,312			
Pseudo R2	0				0				0			
Log likelihood	-54,343				-54,777				-55,346			

Fuente: Cálculos propios. *** significativo al 1%, ** significativo al 5%, * significativo al 10%.

En términos de interpretación de resultados se verifica que los incrementos en la variable de accesibilidad, por ejemplo, con parámetro de fricción igual a 2 (Log(acc)), están relacionados con cambios de usos del suelo desde residencial hacia usos asociados al comercio y dotacional. El signo asociado al coeficiente de esta variable es negativo con respecto al uso industrial y agrícola.

El coeficiente asociado a la distancia a la malla vial (Log(dvias)) también resulta con los signos esperados. Es decir que incrementos en la distancia a vías distritales, regionales o nacionales están relacionados con una disminución de la probabilidad de que el suelo sea usado en actividades comerciales o dotacionales. Por su parte, el signo es positivo con respecto al uso industrial y agrícola,

lo que tiene sentido de acuerdo con la dinámica que generan las disponibilidades a pagar por el uso del suelo dentro de la competencia a la que están sujetos los agentes económicos según la cual el comercio tiene una mayor disponibilidad a pagar respecto a la industria y la agricultura.

La expresión espacial de las probabilidades de uso obtenidas por medio del modelo se puede en toda la región hay una alta probabilidad de tener usos residenciales y que la configuración municipal de usos se diferencia entre municipios a través del uso comercial y el industrial.

Las ecuaciones de probabilidad para cada una de las categorías del uso del suelo se obtienen a partir del modelo multinomial según la siguiente ecuación. Donde cada π_u representa la probabilidad estimada del uso residencial, comercial, industrial, dotacional y agrícola según sea el caso:

$$\pi_u = \frac{e^{\alpha_j + \beta_{j1} x_1 + \beta_{j2} x_2 + \dots + \beta_{jk} x_k}}{\sum_{u=1}^U e^{\alpha_h + \beta_{h1} x_1 + \beta_{h2} x_2 + \dots + \beta_{hp} x_k}}$$

El denominador es el mismo para cada π_u , y los numeradores de los diferentes u suman el denominador, de tal manera que: $\sum_U \pi_u = 1$.

La Tabla 3 resume la probabilidad media de que cada una de las unidades espaciales de la región (manzanas en las zonas urbanas, lotes o terreros en las zonas suburbanas y rurales) tomen un uso específico de los que se han estudiado en el presente documento. Como es de esperar, la mayor probabilidad es del uso residencial. Lo que resulta de interés es como se distribuyen en términos relativos los demás usos analizados.

Tabla 3 – Promedio de probabilidad por uso en Bogotá D.C. y 17 municipios

Uso	Probabilidad	Desv. Est.	Mín	Máx
Residencial	60%	26%	10%	97%
Comercial	4%	6%	0%	80%
Industrial	1%	2%	0%	21%
Dotacional	3%	1%	0%	6%
Agrícola	32%	29%	0%	89%

Fuente: Cálculos propios para 130,065 unidades espaciales.

El uso agrícola toma el segundo lugar en probabilidad, lo que se puede explicar por la extensión de la región y la estructura de accesibilidad para los municipios. Esto último porque dados los demás controles utilizados, en la medida en que un terreno tiene menos acceso se aumenta la posibilidad de que se mantenga en el uso rural. Los usos comercial y dotacional tienen una probabilidad que, si bien no es grande respecto a los usos residencial y agrícola, si es superior respecto al uso industrial. Esto pone de relieve una de las condiciones de la región, la cual se caracteriza por una presencia de áreas comerciales y dotacionales relativamente generalizada mientras que las actividades industriales se concentran en pocas zonas.

Para finalizar la descripción de estos resultados, los Mapas 5 al 9 muestran las probabilidades estimadas por cada una de las categorías de uso del suelo consideradas en el modelo de regresión multinomial. Los resultados muestran que la probabilidad del uso residencial es relativamente alta en las áreas urbanas de los municipios, como es de esperar. El color rojo identifica las unidades

espaciales en donde la probabilidad supera el 80%. El color naranja identifica a las unidades espaciales cuya probabilidad se encuentra entre el 60% y el 80%.

Para el uso comercial, Bogotá concentra las mayores probabilidades de manera concentrada en las áreas predominantes de actividad económica. Lo que llama la atención en este caso, resulta en la aparición de extensiva de este uso probable en los municipios de Chía, Mosquera, Soacha y Zipaquirá. Los dos primeros identificados en el patrón de accesibilidad por empleo mientras que los otros no se identifican como centros relevantes de actividad económica.

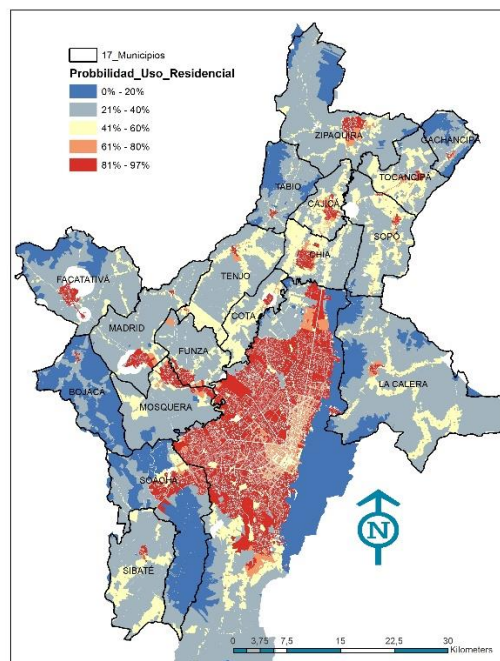
Para el caso del uso industrial, se presenta un patrón de probabilidades dominado por los municipios de Mosquera, Soacha y Funza y Cota. Además, se presentan posibles patrones de ocurrencia en municipios más alejados del núcleo principal como son Sibaté, Bojacá, Facatativá, Cajicá, Sopó, Tocancipá y Gachancipá.

Finalmente, para los usos dotacional y agrícola se tiene el comportamiento esperado. Para el primer uso se observa una mayor probabilidad en las áreas urbanas, mientras para el segundo, se observan para zonas fuera de las áreas urbanas y distantes de los corredores viales.

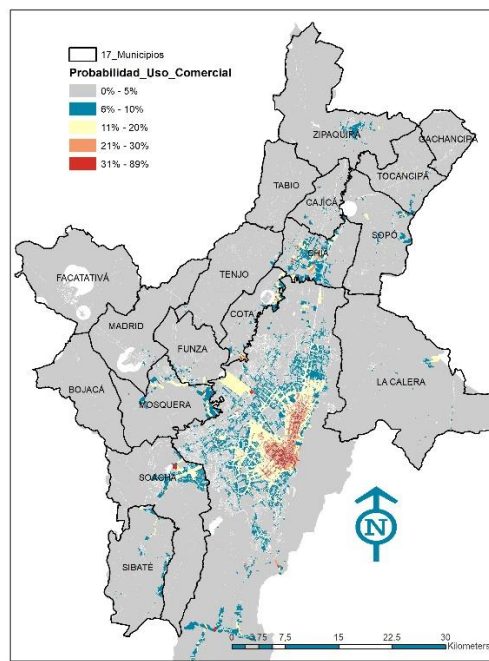
El resultado general se puede resumir desde dos puntos de vista. En el primero, se tiene que el patrón de accesibilidad no es suficiente para identificar la estructura espacial en términos de la vocación económica municipal. En el segundo, al utilizar la distribución de usos de suelo, a través de su probabilidad de ocurrencia controlada por la accesibilidad, se tiene un análisis más preciso de la disposición de los centros urbanos en la región y las posibilidades de localizar actividades de acuerdo con su posición en la estructura regional.

De esta manera, se puede observar cómo en la región se tienen diferentes perfiles de centros urbanos. El núcleo principal donde predominan los usos comerciales y dotacionales, los municipios comerciales al norte y finalmente, los municipios con orientación a la industria, principalmente al occidente, aunque con importancia diferencial y posibilidad de mayor atracción de esta actividad.

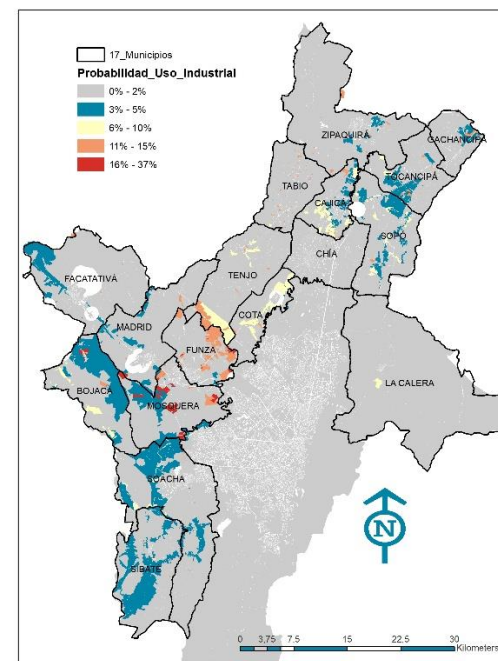
Mapa 5 - Probabilidades de uso residencial.



Mapa 6 - Probabilidades de uso comercial.



Mapa 7 - Probabilidades de uso industrial.



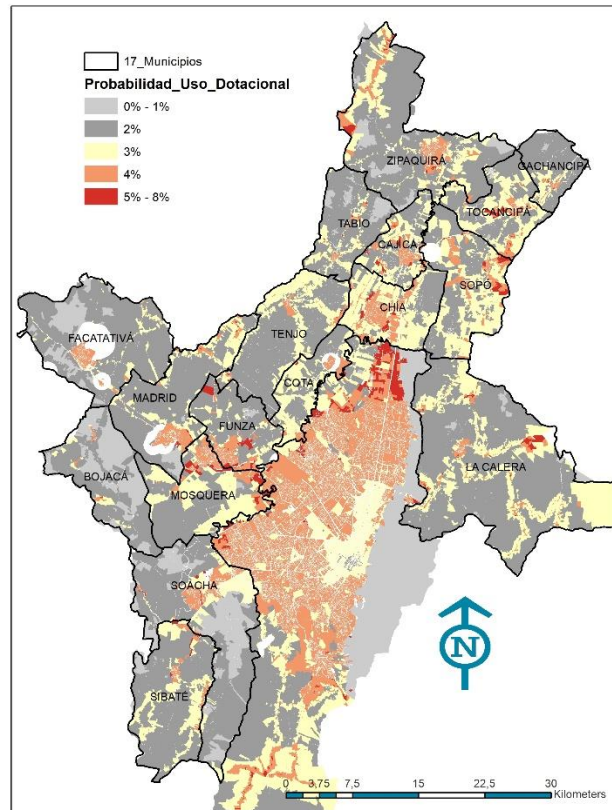
Fuente: Cálculos propios.

Como se mencionó anteriormente, los modelos de uso del suelo están relacionados con las teorías clásicas de la renta del suelo. Desde esta perspectiva, cada unidad de suelo se asigna al uso que represente la mayor renta, teniendo en cuenta los atributos específicos y la localización. Por ejemplo, en la versión más simple representada por un modelo de ciudad monocéntrica que determina el patrón de movilidad de los hogares desde el lugar de residencia hasta el lugar de trabajo (*Central Business District*, CBD), es precisamente la distancia recorrida (costo de transporte) el factor principal que determina la renta del suelo.

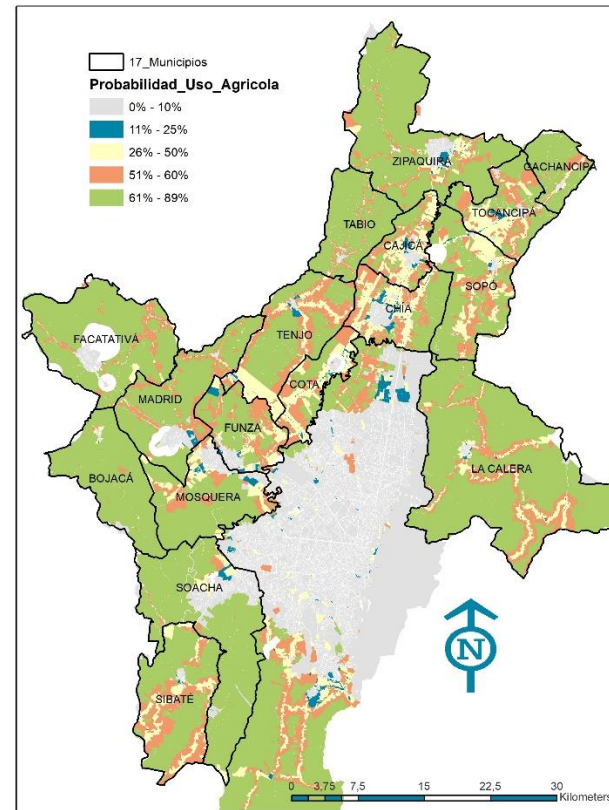
Este modelo permite explicar que los hogares optimizan su localización evaluando la accesibilidad al CBD y la renta del suelo (que es mayor en localizaciones más cercanas al CBD). El equilibrio resultante es un patrón de usos del suelo representado por anillos concéntricos de uso residencial alrededor del CBD en donde la densidad disminuye a medida que la distancia al CBD se incrementa. Lo anterior se encuentra reflejado en los signos asociados a los coeficientes estimados en el modelo de regresión Multinomial.

La estimación de probabilidades de uso de suelo usando el modelo multinomial permite encontrar la distribución de usos de suelo municipal a partir de la estructura espacial regional. En este sentido, resulta importante para el análisis determinar la composición de los centros urbanos de la región de estudio en términos de la distribución de actividades reflejadas en las distintas categorías de uso de suelo incluidas.

Mapa 8 - Probabilidades de uso dotacional.



Mapa 9 - Probabilidades de uso agrícola.



Fuente: Cálculos propios.

Análisis de sensibilidad: zonas de expansión, suburbanas y rurales.

Para explorar los cambios de uso previsible en tres tipos de zonas del área de estudio (en las cuales se concentran los terrenos con mayor disponibilidad para el desarrollo futuro) este apartado muestra los resultados del cambio de las categorías normativas y de la ampliación de la malla vial principal en las probabilidades de uso presentadas en el apartado anterior.

El primer ejercicio considera la recategorización de las zonas suburbanas (que se encuentran en la cobertura de áreas rurales de los municipios y conciernen a 9,630 unidades espaciales, ver Mapa 1) hacia la categoría de zona urbana.

La Tabla 4 muestra compara las probabilidades estimadas del modelo contra una situación en la cual las unidades espaciales mencionadas se consideren como áreas urbanas. La parte superior de la Tabla muestra las probabilidades asociadas a cada uso en la situación actual estimada, mientras que el panel inferior muestra el resultado de la simulación planteada.

Los principales cambios se observan para la probabilidad de uso residencial (la cual se incrementa de 0.52 a 0.94) y para el uso agrícola (que se reduce de 0.38 a 0). La probabilidad de uso comercial e industrial también disminuye, mientras que el uso dotacional aumenta. Estos resultados de la simulación, y en particular la predominancia del uso residencial resultante, invitan a examinar las alternativas normativas que incentiven una mayor mezcla de usos en las zonas de futura urbanización.

Tabla 4 – Cambio en las probabilidades de uso al permitir que las áreas suburbanas se conviertan en urbanas.

Variable	Promedio	Dev. Std.	Min	Max
Probabilidad Residencial	0.520	0.088	0.196	0.783
Probabilidad Comercial	0.022	0.026	0.000	0.404
Probabilidad Industrial	0.059	0.038	0.002	0.210
Probabilidad Dotacional	0.018	0.004	0.007	0.039
Probabilidad Agrícola	0.381	0.094	0.041	0.665
Resultados simulación				
Probabilidad Residencial	0.941	0.018	0.690	0.966
Probabilidad Comercial	0.018	0.019	0.000	0.284
Probabilidad Industrial	0.003	0.003	0.000	0.024
Probabilidad Dotacional	0.037	0.004	0.025	0.059

Probabilidad Agrícola	0.000	0.000	0.000	0.001
-----------------------	-------	-------	-------	-------

Fuente: Cálculos propios.

El siguiente ejercicio de simulación tiene que ver con las áreas de expansión urbana, en las cuales se encuentran 3,823 unidades espaciales. Las probabilidades estimadas del modelo contra una situación en la cual las unidades espaciales mencionadas se trasforman en áreas urbanas (Tabla 5) muestran el aumento de la probabilidad de uso residencial se de 0.69 a 0.94, mientras que la probabilidad del uso agrícola se reduce de 0.215 a 0 (ver Tabla 5).

Tabla 5 – Cambio en las probabilidades de uso al permitir que las áreas de expansión se conviertan en urbanas.

Variable	Promedio	Dev. Std.	Min	Max
Probabilidad Residencial	0.687	0.055	0.359	0.789
Probabilidad Comercial	0.056	0.064	0.000	0.603
Probabilidad Industrial	0.005	0.003	0.000	0.016
Probabilidad Dotacional	0.038	0.005	0.020	0.058
Probabilidad Agrícola	0.215	0.079	0.016	0.588
Resultados simulación				
Probabilidad Residencial	0.939	0.022	0.681	0.962
Probabilidad Comercial	0.019	0.024	0.000	0.289
Probabilidad Industrial	0.005	0.003	0.000	0.027
Probabilidad Dotacional	0.037	0.003	0.024	0.055
Probabilidad Agrícola	0.000	0.000	0.000	0.001

Fuente: Cálculos propios.

El tercer ejercicio de simulación concierne los terrenos ubicados en zonas rurales distintas a áreas suburbanas o de expansión, para los cuales se considera una reducción de 50% en la distancia desde el centroide de cada terreno hasta la vía principal (regional, nacional). Este ejercicio de simulación afecta a 78,813 terrenos según los usos del suelo registrados en los catastros de cada municipio (Mapa 2). La distancia promedio de estas unidades espaciales es de 582 metros, al reducir esta distancia en 50%, se tiene una distancia promedio de 291 metros (Tabla 6).

Tabla 6 – Reducción de la distancia entre terrenos y vías nacionales o regionales.

Variable	Promedio	Desv. est.	Min	Max
Distancia a vías nacionales o regionales	582	674	0	6793
Log(Distancia a vías nacionales o regionales)	5.69	1.32	0.00	8.82
Reducción de la distancia en un 50%				
Distancia a vías nacionales o regionales	291	337	0	3397
Log(Distancia a vías nacionales o regionales)	4.99	1.33	0.00	8.13

Fuente: Cálculos propios.

El resultado de este ejercicio de simulación muestra que la probabilidad de uso residencial se incrementa de 0.42 a 0.46, la probabilidad de uso comercial se incrementa de 0.02 a 0.3 aproximadamente, y la probabilidad de uso agrícola se reduce de 0.53 a 0.48 (ver Tabla 7). Esta es la única de las simulaciones presentadas que aumenta la probabilidad de uso comercial la cual se localizaría en zonas que continuarían siendo catalogadas como rurales, pero tendrían una mejor conectividad, resultado que confirma las anotaciones hechas a las simulaciones anteriores en el sentido que la mezcla de usos es poco probable en zonas urbanas.

Tabla 7 – Cambio en las probabilidades de uso al reducir la distancia entre los terrenos y las vías nacionales o regionales.

Variable	Promedio	Dev. Std.	Min	Max
Probabilidad Residencial	0.417	0.133	0.102	0.789
Probabilidad Comercial	0.019	0.035	0.000	0.801
Probabilidad Industrial	0.013	0.022	0.000	0.210
Probabilidad Dotacional	0.022	0.007	0.006	0.061
Probabilidad Agrícola	0.530	0.163	0.016	0.888
Resultados simulación				
Probabilidad Residencial	0.460	0.127	0.116	0.798
Probabilidad Comercial	0.029	0.048	0.000	0.862
Probabilidad Industrial	0.012	0.022	0.000	0.210
Probabilidad Dotacional	0.025	0.007	0.007	0.061

Probabilidad Agrícola	0.475	0.163	0.010	0.863
-----------------------	-------	-------	-------	-------

Fuente: Cálculos propios.

Los resultados de estos ejercicios de simulación muestran como las modificaciones normativas o de distancia a las vías principales son incorporadas en las decisiones de localización de los agentes económicos a través de las disponibilidades a pagar por el uso del suelo y, por lo tanto, se reflejan en las probabilidades de usos del suelo.

Conclusiones

Las regiones policéntricas pueden reflejar estructuras espaciales de actividad económica concentradas en su núcleo principal o con algún grado de diversificación en la localización de actividades en otros centros urbanos. Esto guarda especial interés en la forma en la que se generan las interacciones entre los centros urbanos y su nivel de diversificación, lo que se traduce en la distribución de los usos del suelo en la región de estudio.

El análisis regional que abarca el presente documento incluye a Bogotá y 17 municipios: Bojacá, Cajicá, Chía, Cota, Facatativá, Funza, Gachancipá, La Calera, Madrid, Mosquera, Soacha, Sibaté, Sopó, Tabio, Tenjo, Tocancipá y Zipaquirá. La región de estudio no está organizada ni planeada de manera conjunta, por lo que la mayor parte de los fenómenos observados en el territorio obedecen en su mayor medida a dinámicas generadas por la influencia económica de Bogotá y los intereses locales de atracción de actividades económicas y residenciales en la estructura regional como un todo.

El documento tiene como objetivo analizar cómo la estructura espacial de la región influye en la ocupación del suelo y la distribución de usos a través de los niveles de accesibilidad espacial, calculada como la suma del número de empleos ponderada por la distancia. Con el uso de esta medida se logra reconocer el patrón de usos en la región e identificar las diferencias de los centros intra-regionales. El patrón de accesibilidad regional da indicios de la concentración del empleo y por ende la actividad económica en el espacio regional. Como es de esperar, los valores más altos del indicador se encuentran en Bogotá como ciudad principal, explicando la mayor parte de las aglomeraciones que se han identificado previamente en la literatura. Específicamente, las zonas de los centros empresariales, industriales, las zonas de comercio y el aeropuerto.

El resultado general se puede resumir desde dos puntos de vista. En el primero, se tiene que el patrón de accesibilidad no es suficiente para identificar la estructura espacial en términos de la vocación económica municipal. En el segundo, si se utiliza la distribución de usos de suelo, a través de su probabilidad de ocurrencia controlada por la accesibilidad, se tiene un análisis más preciso de la disposición de los centros urbanos en la región y las posibilidades de localizar actividades de acuerdo con su posición en la estructura regional.

Los resultados específicos se pueden resumir de la siguiente manera. Las estimaciones de usos del suelo muestran que la probabilidad del uso residencial es relativamente alta en las áreas urbanas de los municipios, como es de esperar. Para el caso del uso comercial, Bogotá concentra las mayores

probabilidades del uso, de manera concentrada en las áreas predominantes de actividad económica. Lo que llama la atención en este caso, es la aparición de extensiva de este uso en los municipios de Chía, Mosquera, Soacha y Zipaquirá. Para el caso del uso industrial, se presenta un patrón de probabilidades dominado por los municipios de Mosquera, Soacha, Funza y Cota. Además, se presentan posibles patrones de ocurrencia en municipios más alejados del núcleo principal como son Sibaté, Bojacá, Facatativá, Cajicá, Sopó, Tocancipá y Gachancipá. Finalmente, para los usos dotacional y agrícola se tiene el comportamiento esperado, donde para el primer uso se observa una mayor probabilidad en las áreas urbanas, mientras que, para el segundo, se observan zonas fuera de las áreas urbanas y distantes de los corredores viales.

Referencias

Ahlfeldt, Redding, Sturm & Wolf (2015). The economics of density: evidence from the Berlin Wall. *Econometrica*, Vol. 83, No. 6, Pp. 2127-2189.

Alonso, William (1964). *Location and Land Use: Towards a General Theory of Land Rent*. Harvard University Press. Cambridge. MA.

Anas, Arnot & Small (1998). Urban Spatial Structure. *Journal of Economic Literature*, 36(3): Pp. 1426-1464.

Avendaño, Enriquez & Olarte (2014). Estructura urbana y precios del suelo en Bogotá. *Economía y Región*, Vol. 8, No. 2, Pp. 49-80.

Bertaud, Alain (2018). *Order without Design: How Markets Shape Cities*. The MIT Press.

Bowes, D.R. & Ihlanfeldt, K.R. (2001). Identifying the impacts of rail transit stations on residential property values. *Journal of Urban Economics*. 2001, 50, Pp. 1–25.

Brulhart, Marius & Mathys, Nicole (2008). Sectoral Agglomeration Economies in a Panel of European Regions. *Regional Science and Urban Economics*. 38. Pp. 348-362.

Cameron y Trivedi (2005). *Microeconometrics: Methods and Applications*. Cambridge University Press.

Ciccone, Antonio (2002). Agglomeration Effects in Europe. *European Economic Review*. Vol. 46. Pp. 213-227.

Ciccone, Antonio & Hall, Robert (1996). Productivity and the Density of Economic Activity. *American Economic Review*. 86 (1). Pp. 54-70.

Combes; Duranton; Gobillon & Roux (2010). Estimating Agglomeration Effects with History, Geography and Worker Fixed Effects. In Glaeser, Edward (ed.) *Agglomeration Economies*. Chicago. IL: University of Chicago Press.

Combes, Pierre-Philippe & Gobillon, Lauren (2015). The Empirics of Agglomeration Economies. In Duranton, Henderson and Strange (editors). *Handbook of Urban and Regional Economics*, Vol. 5, Elsevier (2015).

Combes, P., Mayer, T. & Thisse, J. (2008). *Economic Geography. Integration of Regions and Nations*. Princeton University Press. Princeton - Oxford.

dell'Olio, Cordera & Ibeas (2018). Random Utility Theory and Land Use – Transport Interaction Models. En Cordera, Ibeas, dell'Olio and Alonso (2018) editors: *Land Use – Transport Interaction Models*. CRC Press, Taylor & Francis Group.

Dowall, D. E. and P. A. Treffeisen (1991). Spatial Transformation in Cities of the Developing World. Multinucleation and Land-Capital Substitution in Bogotá, Colombia. *Regional Science and Urban Economics*, 21(2).

Duranton, Gilles & Puga, Diego (2004). Micro-foundations of Urban Agglomeration Economies. In Henderson and Thisse (editors). *Handbook of Urban and Regional Economics*, Vol. 4.

Eliasson, Kopsch, Mandell & Wilhelmsson (2020). Transport mode and the value of accessibility – A potential input for sustainable investment analysis. *Sustainability*, 12, 2143.

Ellison, G., Glaeser, E.L. and Kerr, W.R. (2010), What causes industry agglomeration? Evidence from Coagglomeration patterns, *American Economic Review*, Vol. 100 No. 3, pp. 1195-1213.

Estupiñán, Roca y Marmolejo (2017). El distrito central de negocios y los subcentros de empleo en la estructura económica metropolitana. En Roa (compilador), Bogotá en la Encrucijada del Desorden. Universidad Externado de Colombia.

Fernández-Maldonado, A. Romein, A. Verkoren, O. & Parente, R. (2014). Polycentric structures in Latin American metropolitan areas: Identifying employment sub-centres. *Regional Studies*, 48(12), 1954-1971.

Fujita, Masahisa & Thisse, Jacques-Francois (2002). *Economics of Agglomeration: Cities, Industrial Location and Regional Growth*. Cambridge University Press.

Fujita, M. and Ogawa, H. (1982), Multiple equilibria and structural transition of non-monocentric urban configurations. *Regional Science and Urban Economics*, Vol. 12 No. 2, pp. 161-196.

García-López, M.-À. and Muñiz, I. (2013). Urban spatial structure, agglomeration economies, and economic growth in Barcelona: An intra-metropolitan perspective. *Papers in Regional Science*, 92: 515-534. doi:10.1111/j.1435-5957.2011.00409.x

Gordon, P. & Richardson, H. (1996). Beyond Polycentricity: The Dispersed Metropolis, Los Angeles, 1970-1990, *Journal of the American Planning Association*, 62(3), 289-295.

Green, N. (2007). Functional polycentricity: A formal definition in terms of social network analysis. *Urban Studies*, 44(11), 2077-2103

Hanssens, H., Derudder, B., Van Aelst, S., & Witlox, F. (2014). Assessing the functional polycentricity of the mega-city-region of Central Belgium based on advanced producer service transaction links. *Regional Studies*, 48(12), 1939-1953.

Hall, P. G., & Pain, K. (Eds.). (2006). *The polycentric metropolis: learning from mega-city regions in Europe*. Routledge.

Holmes & Sieg (2015). Structural Estimation in Urban Economics. In Duranton et al. *Handbook of Regional and Urban Economics*, Vol. 5A. Elsevier B.V.

Jaramillo, Samuel (2009). *Hacia una teoría de la renta del suelo urbano*. Ed. Universidad de los Andes. Bogotá D.C.

Jedwab, R., & Vollrath, D. (2015). Urbanization without growth in historical perspective. *Explorations in Economic History*, 58, 1-21.

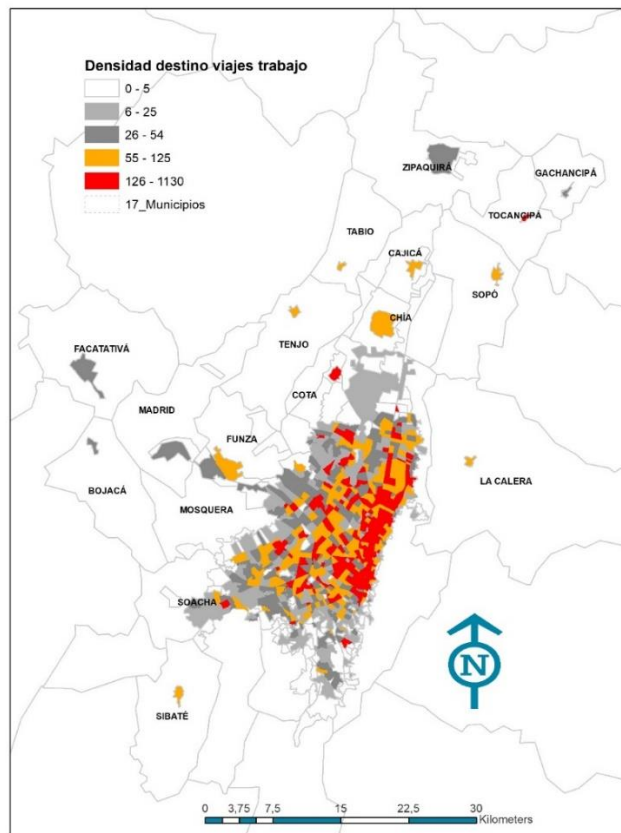
Kloosterman & Musterd (2001). The polycentric Urban region: Towards a research Agenda. *Urban Studies*, 38, Pp. 623-633.

- Koomen & Stillwell (2007). Modelling land-use change. In Koomen, Stillwell, Bakema and Scholten (2007) editors: *Modelling Land-Use Change: Progress and Applications*. Published by Springer, Dordrecht-The Netherlands.
- Kraas, F., Leggewie, C., Lemke, P., Matthies, E., Messner, D., Nakicenovic, N., ... & Butsch, C. (2016). *Humanity on the move: Unlocking the transformative power of cities*. WBGU-German Advisory Council on Global Change.
- Liu, X., Derudder, B., & Wang, M. (2018). Polycentric urban development in China: A multi-scale analysis. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 45(5), 953-972.
- Lucas, R. & Rossi-Hansberg (2002). On the internal structure of cities. *Econometrica*. Vol. 70, No. 4 (2), Pp 1445-1476.
- Marshall, Alfred (1890). *Principles of Economics*. Macmillan. London. 1890.
- Muñiz, García-López & Galindo (2008). The effect of employment sub-centres on population density in Barcelona. *Urban Studies*, Vol. 45, Num. 3, Pp. 627-649.
- Meijers, E. (2005). Polycentric urban regions and the quest for synergy: is a network of cities more than the sum of the parts?. *Urban studies*, 42(4), 765-781.
- Meijers, E. J., & Burger, M. J. (2010). Spatial structure and productivity in US metropolitan areas. *Environment and planning A*, 42(6), 1383-1402.
- Meijers, E. J., & Burger, M. J. (2017). Stretching the concept of 'borrowed size'. *Urban Studies*, 54(1), 269-291.
- Melo; Graham & Noland (2009). A Meta-Analysis of Estimates of Urban Agglomeration Economies. *Regional Science and Urban Economics*. 39. Pp. 332-342.
- Mills, Edwin (1967). An Aggregative Model of Resource Allocation in a Metropolitan Area. *The American Economic Review*. Vol. 57. No. 2. Pp. 197-210.
- Möck, M., & Küpper, P. (2020). Polycentricity at its boundaries: consistent or ambiguous?. *European Planning Studies*, 28(4), 830-849.
- Morikawa, Masayuki (2011). Economies of Density and Productivity in Service Industries: An Analysis of Personal Service Industries Based on Establishment-Level Data. *Review of Economics and Statistics*. Vol. 93. Pp. 179-192.
- Münter, A., & Volgmann, K. (2020). Polycentric regions: Proposals for a new typology and terminology. *Urban Studies*. <https://doi.org/10.1177/0042098020931695>
- Muñiz & García-Lopez (2010). The polycentric knowledge economy in Barcelona. *Urban Geography*, 31, Pp. 774-799.
- Muth, Richard (1969). *Cities and Housing*. University of Chicago Press. Chicago.
- Parr, J. (2004). The polycentric urban region: a closer inspection. *Regional studies*, 38(3), 231-240.

- Rojas Quezada, Carolina Alejandra, Muñiz Olivera, Iván, & García-López, Miguel Ángel. (2009). Estructura urbana y policentrismo en el Área Metropolitana de Concepción. *EURE* (Santiago), 35(105), 47-70. <https://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612009000200003>
- Rosenthal, Stuart & Strange, William (2003). Geography. Industrial Organization and Agglomeration. *The Review of Economics and Statistics*. May 2003, 85 (2), Pp. 377-393.
- Salvati, L., Venanzoni, G., Serra, P. et al. Scattered or polycentric? Untangling urban growth in three southern European metropolitan regions through exploratory spatial data analysis. *Ann Reg Sci* 57, 1–29 (2016). <https://doi.org/10.1007/s00168-016-0758-5>
- Secretaría Distrital de Planeación (SDP), IDOM. 2018. Estudio de Huella Urbana.
- Trufello, R. & Hidalgo, R. (2015). Policentrismo en el Área Metropolitana de Santiago de Chile: reestructuración comercial, movilidad y tipificación de subcentros. *EURE*, 41(122), 49-73.
- Usach, N. Garrido-Yserte, R. Gallo-Rivera, M. (2017). Organización territorial y funcional de la metrópoli de Buenos Aires. *EURE*, 43(128), 1-26.
- Vasanen, A. (2012). Functional polycentricity: examining metropolitan spatial structure through the connectivity of urban sub-centres. *Urban studies*, 49(16), 3627-3644.
- Verburg, Schot, Dijst & Veldkamp (2004). Land use change modelling: current practice and research priorities. *GeoJournal*, 61, Pp. 309-324.
- Wang, T., Yue, W., Ye, X., Liu, Y., & Lu, D. (2020). Re-evaluating polycentric urban structure: A functional linkage perspective. *Cities*, 101, 102672.
- Xingjian Liu & Ben Derudder & Kang Wu, 2016. "Measuring Polycentric Urban Development in China: An Intercity Transportation Network Perspective," *Regional Studies*, Taylor & Francis Journals, vol. 50(8), pages 1302-1315.
- Xu, Y. McNamara, P. Wu, Y. & Dong, Y. (2013). An econometric analysis of changes in arable land utilization using multinomial logit model in Pinggu district Beijing. China. *Journal of Environmental Management*. Pp. 324-334.
- Zheng, S.; Hu, X.; Wang, J.; Wang, R. (2016). Subways near the subway: Rail transit and neighborhood catering businesses in Beijing. *Transport Policy*, 2016, 51, Pp. 81–92.
- Zhao, M., & Chen, C. (2011). Polycentric network organization of mega-city regions in Yangtze River delta. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2, 309-214.

ANEXOS

Mapa A1. Densidad de viajes con destino trabajo por hectárea



Fuente: Cálculos propios con información de la Encuesta de Movilidad (2015).

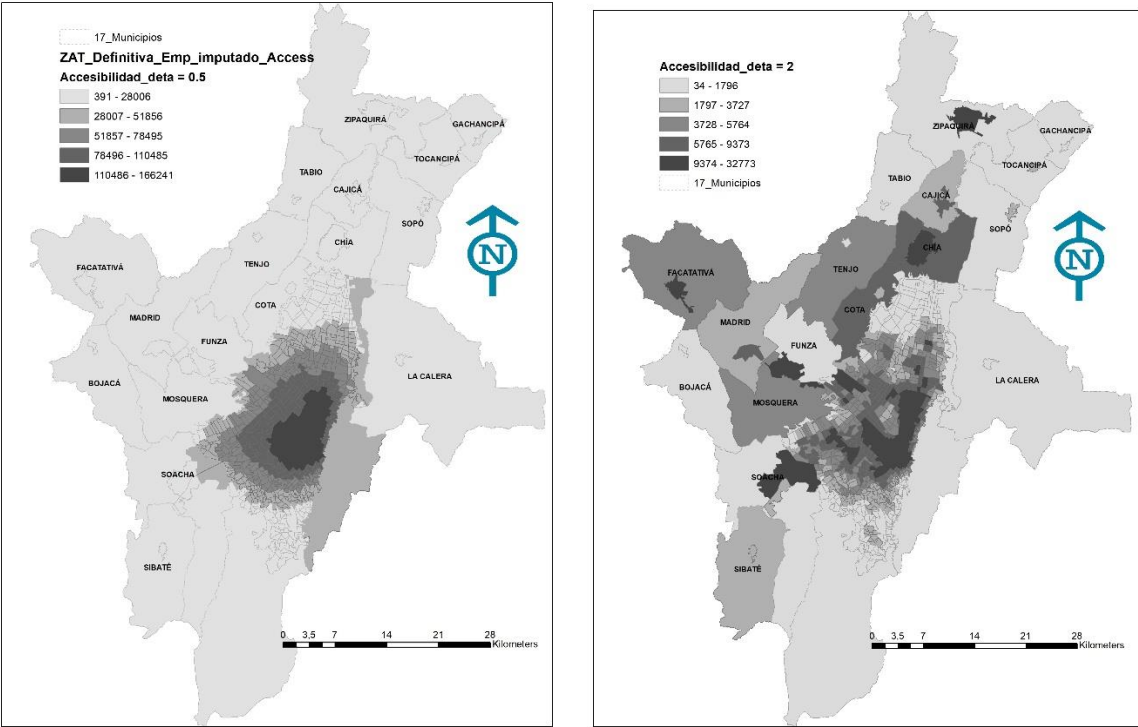
Tabla A1 - Test de Small-Hsiao para comprobar alternativas independientes (IIA)

Ho: Odds (Outcome-J vs Outcome-K) are independent of other alternatives.

Omitted	lnL (full)	lnL (omit)	chi2	df	P>chi2	evidence
5	-2.01e+04	-2.01e+04	42.738	30	0.062	for Ho
6	-2.56e+04	-2.56e+04	37.062	30	0.175	for Ho
7	-2.18e+04	-2.18e+04	28.178	30	0.561	for Ho
8	-1.39e+04	-1.39e+04	41.717	30	0.076	for Ho

Fuente: Cálculos propios.

Mapa A2. Cambios en el indicador de accesibilidad de acuerdo con el parámetro de fricción, 0.5 izquierda y 2 derecha



Fuente: Cálculos propios.