

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE COAHUILA  
CENTRO DE INVESTIGACIONES SOCIOECONÓMICAS**

**TESIS**

TESIS  
2020

RAFAEL LUGO ALVARADO

**“La incidencia de la aglomeración urbana en la  
distribución espacial de emisiones contaminantes”**



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE COAHUILA**  
**CENTRO DE INVESTIGACIONES SOCIOECONÓMICAS**  
**MAESTRÍA EN ECONOMÍA REGIONAL**

**TESIS**

**La incidencia de la aglomeración urbana en la distribución  
espacial de emisiones contaminantes**

que presenta como requisito parcial para obtener  
el grado de Maestro en Ciencias en Economía Regional

**RAFAEL LUGO ALVARADO**

**Comité Evaluador:**

Director: Dra. Alba V. Méndez Delgado  
Codirector: Dr. David Mendoza Tinoco  
Lectores: Dr. Luis Enrique Satiago G.  
Dr. Gustavo Félix Verduzco

Saltillo, Coahuila  
Agosto de 2020

<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1. Consideraciones teóricas sobre la contaminación del aire en las ciudades como deseconomía de aglomeración</b>	<b>7</b>
1.1. ¿Qué se entiende por aglomeración? . . . . .	8
1.2. Economías de aglomeración . . . . .	9
1.2.1. Economías de localización . . . . .	10
1.2.2. Economías de urbanización . . . . .	10
1.2.3. Nueva geografía económica (NGE) . . . . .	11
1.3. Ciudad y urbanización . . . . .	13
1.3.1. Ciudad . . . . .	13
1.3.2. Urbanización . . . . .	15
1.4. Deseconomías de aglomeración . . . . .	16
1.4.1. Contaminación del aire en las ciudades . . . . .	17
1.5. Revisión general sobre externalidades y los mercados . . . . .	19
1.5.1. Externalidades . . . . .	19

1.5.2.	La relación economía- medio ambiente . . . . .	20
1.5.3.	Leyes de la termodinámica . . . . .	21
1.6.	Evidencia empírica de las economías y diseconomías de aglomeración . . . . .	22
1.6.1.	La existencia de las economías de aglomeración . . . . .	22
1.6.2.	Los costos de la aglomeración . . . . .	24
<b>2.</b>	<b>Metodología y Datos</b>	<b>29</b>
2.1.	Metodología . . . . .	30
2.1.1.	Autocorrelación espacial . . . . .	30
2.1.2.	Matrices de pesos espaciales . . . . .	31
2.1.3.	Indicadores de autocorrelación espacial global . . . . .	32
2.1.4.	Autocorrelación espacial local . . . . .	33
2.1.5.	El proceso autorregresivo . . . . .	34
2.1.6.	Modelos de regresión espacial . . . . .	35
2.1.7.	Intepretación de los modelos SAR, SAC y SDM . . . . .	39
2.1.8.	Diagnóstico para la especificación del modelo . . . . .	40
2.2.	Datos y selección de variables . . . . .	43
2.2.1.	Distribución espacial de los datos . . . . .	48
<b>3.</b>	<b>Análisis de econometría espacial</b>	<b>54</b>
3.1.	Análisis espacial exploratorio . . . . .	55
3.1.1.	Dependencia espacial global . . . . .	55
3.1.2.	Dependencia espacial local . . . . .	57
3.2.	Resultados de los modelos de regresión espacial . . . . .	61
3.2.1.	Interpretación de los resultados . . . . .	67

<b>4. Extensión del análisis econométrico por contaminante</b>	<b>73</b>
4.1. Análisis econométrico de las $PM_{10}$ . . . . .	73
4.1.1. Impactos directo, indirecto y total . . . . .	75
4.2. Análisis econométrico de las $PM_{2.5}$ . . . . .	77
4.2.1. Impactos directo, indirecto y total . . . . .	77
4.3. Análisis econométrico del CO . . . . .	80
4.3.1. Impactos directo, indirecto y total . . . . .	80
<b>Conclusiones</b>	<b>85</b>
Referencias . . . . .	90

La degradación ambiental acumulada ha generado, en las últimas décadas, efectos sin precedentes, donde la contaminación del aire y el cambio climático son algunos de los que mayores riesgos representan para el bienestar de la población mundial. Las actividades productivas y las condiciones socioeconómicas de cada región son elementos que ayudan a entender ese fenómeno. La necesidad de impulsar el crecimiento económico como la vía para satisfacer las necesidades de una población creciente, donde mayores niveles de consumo se relacionan con mayores niveles de bienestar, relegaron el problema de la contaminación ambiental a un plano secundario. Al mismo tiempo, la concentración sistemática de la población y las actividades económicas en las ciudades presiona el uso de recursos naturales y conduce a la degradación del medio ambiente, dentro de un escenario en la cual los mecanismos de mercado no incorporan elementos para revertir esa situación. Ante ese escenario, las medidas de política pública y la investigación científica orientadas a la consecución de la sustentabilidad ambiental se vuelven imprescindibles.

En ese contexto se circunscribe el presente trabajo, de modo que la investigación se centra en definir la aglomeración urbana, de acuerdo a diversos factores socioeconómicos, y las externalidades negativas que implican para la calidad del aire. Se pretende determinar el impacto de factores asociados con la aglomeración urbana que estimulan la contaminación del aire en los municipios de México para el año 2013, para con ello contribuir al acervo de conocimiento que coadyuve al diseño de política pública ambiental más asertivo.

Para lograr ese fin se establecen los siguientes objetivos particulares: a) Identificar los factores socioeconómicos de la aglomeración que inciden en la contaminación del aire; b) Probar la existencia de dependencia espacial en la contaminación del aire y en las variables socioeconómicas de la aglomeración; c) Analizar la relación de la contaminación del aire y la aglomeración urbana considerando la presencia de dependencia espacial; d) Determinar la existencia de *spillovers* espaciales de la contaminación del aire.

La tesis considera como premisa que los factores productivos y otros recursos se ven atraídos hacia las ciudades como consecuencia de las economías de aglomeración. Este fenómeno supone el reagrupamiento de firmas en general y la manufactura en particular, así como la concentración de la población con fines de producción y consumo, de tal forma que estimulan la urbanización, e implica las actividades de transporte requeridas para el desplazamiento de trabajadores, consumidores y bienes. La contaminación del aire es entendida en relación con el volumen de emisiones liberadas a la atmósfera. Además, en el trabajo se considera que un patrón espacial de contaminación surge como resultado de una concentración excesiva de firmas y población en las ciudades.

## ***Contexto Económico-Ambiental***

El cambio climático es la externalidad negativa más desafiante a la que se ha enfrentado la humanidad, y que más riesgo representa para el desarrollo sostenible de las ciudades alrededor del mundo. Un aspecto importante es la creciente demanda de recursos económicos requerida para resarcir los daños derivados de catástrofes naturales y materializar planes de mitigación y adaptación (UN, 2019a).

La comunidad científica ha aceptado que este cambio en los patrones climatológicos se debe en su componente antropogénico, a la emisión de Gases de Efecto invernadero (GEI)<sup>1</sup> asociado al crecimiento económico basado en la industrialización y la expansión demográfica.

---

<sup>1</sup>Los GEI más relevantes son el vapor de agua, el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), el metano ( $CH_4$ ), el óxido nítrico ( $N_2O$ ) y los gases fluorados. Estos gases se caracterizan por absorber la radiación solar y retenerla en forma de calor entre la superficie y la atmósfera con temperaturas que permiten la vida en tierra, es un fenómeno natural conocido como efecto invernadero. El problema del calentamiento global consiste en el aumento de las temperaturas medias como resultado de una mayor concentración de gases GEI en la atmósfera, esa alteración es atribuible a las emisiones generadas por procesos industriales y la quema de combustibles fósiles

Algunos GEI son dañinos para la salud humana, es decir son contaminantes. Además, el mismo proceso económico emite otros gases que, a pesar de no contribuir al efecto invernadero, son contaminantes, y junto con los anteriores, generan el fenómeno de contaminación del aire. (IPCC, 2014).

Cuando estos gases y otras emisiones derivadas del proceso económico dañan la salud humana adquieren la clasificación de contaminantes, cuya dispersión por el viento y su presencia prolongada en la atmósfera derivan en una pobre calidad del aire que se respira. La contaminación del aire es uno de los mayores desafíos que enfrentan los países de todo el mundo, sin embargo, las condiciones socio económicas y materiales desde las cuales se afronta son sumamente desiguales, de tal forma que los efectos negativos se resienten con mayor intensidad en los países de bajos ingresos, sobre todo en zonas empobrecidas de las ciudades. Al interior de los países e inclusive dentro de sus regiones, las causas y consecuencias de la reducción en la calidad del aire suelen ser diferenciadas, pues las condiciones locales como la actividad económica, el uso de la energía, el estilo de vida, los usos del suelo, la tecnología y la importancia asignada a la política medio ambiental se reconocen como determinantes importantes (UN, 2018).

La contaminación del aire genera graves problemas sociales y económicos. En el primer caso es posible afirmar que la contaminación del aire en las ciudades se ha posicionado como un problema de salud pública ya que, el material particulado<sup>2</sup>  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  al ser respirado por los humanos penetra en los pulmones y se absorbe en la sangre, ocasionando enfermedades en el sistema nervioso, padecimientos cardíacos, cáncer de pulmón y enfermedades respiratorias crónicas (Kampa and Castanas, 2008). Asimismo, los problemas de salud pública trascienden al ambiente económico, en forma de mayores gastos en salud y menor productividad debido a la carga de enfermedades en la fuerza de trabajo (OECD, 2016). La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que la contaminación del aire ocasiona 4.2 millones de muertes prematuras al año, y además cerca del 80 % de las personas que vive en zonas urbanas donde se mide la calidad del aire se encuentran expuestas a altas concentraciones de contaminantes (WHO, 2018).

---

<sup>2</sup>se conocen como partículas finas y están compuestas por sulfato, nitratos, amoníaco, cloruro de sodio, carbono negro, polvo mineral y agua. Se originan en procesos industriales, vehículos de combustión interna, plantas generadoras de electricidad entre otras fuentes.

En términos económicos la emisión de gases contaminantes genera problemas que desbordan la esfera local y regional a través del cambio climático, por ejemplo, el aumento de las temperaturas medias ocasiona un desbalance en los ecosistemas y afecta negativamente las actividades productivas relacionadas con la biodiversidad. Asimismo, fenómenos naturales como inundaciones repentinas y sequías prolongadas son cada vez más frecuentes, y reducen la seguridad de las actividades humanas y comprometen los servicios básicos y la infraestructura construida (UN, 2018).

Al ser un problema de dimensiones globales que se encuentra interconectado a otros problemas sociales igualmente de carácter global, la Organización de las Naciones Unidas (ONU), a través de los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) ha planteado la urgencia de afrontar esta problemática, particularmente a través de los objetivos:

- **Objetivo 11:** Lograr ciudades y asentamientos humanos inclusivos, resilientes y sostenibles.
- **Objetivo 7:** Asegurar el acceso a energías sustentables y asequibles para todos.
- **Objetivo 8:** Promover el desarrollo económico sustentable, empleo productivo y decente para todos.
- **Objetivo 9:** Construir infraestructura resiliente, promover una industrialización sustentable e impulsar la innovación.
- **Objetivo 12:** Establecer patrones de producción y consumo sustentables
- **Objetivo 13:** Implementar acciones urgentes contra el cambio climático y sus impactos.

Por otro lado, el avance de la urbanización en los países se asocia con mayores niveles de bienestar y productividad gracias al aprovechamiento de las economías de aglomeración, aunque como se ha mencionado se asocia con el deterioro medioambiental, debido a que el funcionamiento de las grandes ciudades demanda una enorme cantidad de recursos materiales y energéticos los cuales a través de procesos físicos y químicos se transforman en grandes volúmenes de emisiones liberadas a la atmósfera derivando en una mala calidad del aire. Las ciudades son los mayores contribuidores de las emisiones de efecto invernadero al aportar 75% de las emisiones de CO<sub>2</sub> y, al mismo tiempo, en el 97% de las ciudades en países con ingresos medios y bajos se respira aire contaminado. El tráfico, los procesos industriales, la

generación de energía, la incineración de desechos sólidos y la quema de combustibles de uso residencial se cuentan entre los mayores responsables (UN, 2018).

Respecto a los patrones demográficos, la última revisión sobre la urbanización del mundo realizada en 2018 por Naciones Unidas estimó que el 55 % de la población mundial reside en áreas urbanas y se espera que esa proporción se eleve a 68 % para el año 2050, lo cual significa que las áreas urbanas recibirán 2.5 mil millones de nuevos habitantes en los próximos años. Tal situación será especialmente sensible en los países en desarrollo donde la urbanización produce ciudades extensas y dispersas, con infraestructuras saturadas y deficientes que profundizan los problemas medioambientales. Actualmente, las regiones más urbanizadas del mundo son Norte América y Latinoamérica, con un grado de urbanización de 82 % y 81 % respectivamente (UN, 2019).

La reducción de las emisiones tanto de GEI como de contaminantes aéreos es crucial para conseguir la sustentabilidad de las ciudades, así como en el cumplimiento de los ODS en general. El diseño de políticas encaminadas a generar procesos de desarrollo sostenible en las ciudades requiere de información sobre la compleja dinámica entre las economías urbanas y la contaminación atmosférica. Es en este contexto en el que se circunscribe la presente investigación.

En la literatura económica se reconoce que las actividades económicas exhiben patrones de aglomeración espacial, esto remite a la cuestión de si los contaminantes muestran patrones de aglomeración espacial. Dado la naturaleza del problema cabe la posibilidad de que las características de la localización esté vinculada con la dispersión de los contaminantes en el espacio, por lo que se trataría de un fenómeno espacial.

Existen múltiples investigaciones que abordan esta problemática con base en las economías de aglomeración. Desde Estados Unidos y Europa han surgido una cantidad de estudios abordando la cuestión del tamaño de las ciudades y los costos pecuniarios y medioambientales asociados. Sin embargo, una de las críticas más frecuentes a esa literatura es que ignora los efectos espaciales entre regiones vecinas, de modo que si éstas exhiben patrones espaciales entonces las estimaciones realizadas con técnicas econométricas no espaciales sufren de problemas de endogeneidad, por ende, las estimaciones serán inconsistentes, esto implica que los resultados sean imprecisos y puedan extraerse conclusiones incorrectas.

En consecuencia, otra rama de la literatura de reciente desarrollo emplea técnicas de econometría espacial para modelar explícitamente la dependencia espacial entre regiones. De manera que los estudios sobre contaminación del aire y su vinculación con las zonas urbanas mediante técnicas de econometría espacial son relativamente novedosos, sin embargo, la cuantificación de los *spillovers* entre regiones se encuentra poco estudiada. En el caso de México las investigaciones en la materia con métodos espaciales son prácticamente inexistentes.

Tomando en cuenta la disponibilidad de datos a nivel municipal para todo México, se construye una variable representativa de las emisiones que abarque el problema de la contaminación del aire. Se contempla el material particulado de  $10\mu m$  y  $2.5\mu m$  ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) puesto que estas sustancias tienen efectos degenerativos en la salud. Asimismo, se incluye la generación de monóxido de carbono ya que representa mas del 70% de las emisiones de gases contaminantes en México. Las variables explicativas se eligieron de modo que representan diferentes dimensiones de la aglomeración urbana.

Los resultados del análisis espacial muestran que la contaminación presenta dependencia espacial, y de acuerdo a la distribución espacial de las emisiones contaminantes se forman conglomerados de municipios con altos niveles de contaminación, estas conglomeraciones corresponden a las principales aglomeraciones urbanas del país. Además, los resultados constatan que los factores socioeconómicos de la aglomeración urbana, como el grado de urbanización, la densidad del automóvil, la actividad manufacturera, el número de firmas instaladas y la concentración geográfica del sector secundario tienen una influencia significativa en la generación de emisiones contaminantes.

El documento se divide en 4 capítulos además de la presente introducción. En el primero, se exponen desde la perspectiva de la economía espacial el vínculo teórico entre los fundamentos de la ciudad (aglomeración y urbanización) y la contaminación asociada a la actividad económica, así como la evidencia empírica. En el segundo capítulo se exponen los métodos propios de la econometría espacial que soportan el análisis cuantitativo, además, se muestra la selección de las variables y la distribución espacial de los datos. En los capítulos tres y cuatro se desarrolla el análisis econométrico, en el cual se presentan las pruebas de dependencia espacial y las estimaciones de los modelos espaciales. Por último se ofrecen las conclusiones generales y se presenta la bibliografía utilizada.

# CAPÍTULO 1

---

## CONSIDERACIONES TEÓRICAS SOBRE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN LAS CIUDADES COMO DESECONOMÍA DE AGLOMERACIÓN

En este capítulo se explica en qué consiste el fenómeno de aglomeración y se exponen las principales consideraciones teóricas en torno a las economías y deseconomías aglomeración. En primer lugar se revisa la propuesta Marshalliana de las economías de localización que explican la formación de *clusters* industriales, luego, se revisan las economías de urbanización las cuales describen la fuerzas que motivan la concentración de firmas de diferentes sectores a localizarse en las ciudades, y la nueva geografía económica donde se argumenta que la aglomeración surge en cualquier nivel de la geografía.

De manera sintética se define la *ciudad* como un fenómeno multidimensional y es un concepto que alude a diferentes aspectos de un mismo fenómeno. También se explica brevemente que la urbanización hace alusión de la transición económica y social desde lo rural hacia lo urbano, es decir, pasar de una organización espacial dispersa a una concentrada, de actividades primarias a actividades de manufactura y servicios.

Una vez detallado porqué una proporción mayúscula las actividades económicas se encuentran en las ciudades, se revisa cómo la actividad de mercado genera externalidades que perjudican el medio ambiente, específicamente a la contaminación del aire.

Finalmente, la evidencia empírica muestra que la existencia de las economías de aglomeración ha sido bien documentada, pero la relación entre aglomeración y medio ambiente se encuentra en desarrollo, además, en la literatura se aprecia un creciente interés por las técnicas de análisis espacial.

## 1.1. ¿Qué se entiende por aglomeración?

Durante las últimas décadas economistas y geógrafos han resaltado el papel crucial del espacio en la economía. La configuración espacial de la actividad económica se caracteriza por distribuirse de manera heterogénea en el espacio y al mismo tiempo concentrada en aglomeraciones que divergen. En consecuencia, la ciencia económica ha dado al término aglomeración una carga teórica a fin explicar esta realidad. La evidencia teórica sugiere que las aglomeraciones surgen porque son la forma de organización espacial más eficiente.

Una distribución geográfica uniforme de agentes económicos es inalcanzable inclusive en ausencia de economías de escala, por dos razones que se desprenden del teorema de la imposibilidad espacial de Starrett. En primer lugar, dado que las actividades económicas no son perfectamente divisibles, necesariamente deben estar localizadas en un solo lugar, en otras palabras, las instalaciones de una firma tienen una ubicación geográfica específica y, además, su fragmentación, aunque fuese deseable no es factible. En segundo lugar, la dotación desigual de recursos y características físicas del espacio otorgan a cada lugar condiciones particulares que si bien no son el determinante principal inciden en su desarrollo (Puga, 2010).

Las fuerzas espaciales del mercado y el comercio conducen la formación de aglomeraciones. Este fenómeno se define como la agrupación y acumulación de actividades económicas a cualquier nivel de la geografía, en ese sentido, el término aglomeración urbana se entiende como la centralización de factores productivos a escala de la ciudad (Fujita et al., 1999).

La aglomeración es la conclusión de un equilibrio espacial entre fuerzas centrífugas y centrípetas que conjuntamente determinan las decisiones de localización de productores y consumidores, de modo que ningún agente tenga incentivos para moverse. Declaran que el concepto de aglomeración abarca diferentes fenómenos, que van desde los clústeres industriales, pasando por la formación de ciudades, hasta la estructura centro- periferia dentro de regiones, países o a nivel mundial, se trata, pues, de la misma lógica operando con distinta intensidad en diferentes escalas (Fujita and Thisse, 1996).

La aglomeración también ha sido entendida como un fenómeno acotado a las ciudades, así pues, alude a la concentración geográfica de firmas y trabajadores y consumidores en ciudades, donde las economías de escala externas para el conjunto de la actividad económica

son el principio que alienta la concentración, en cambio las desamenidades de la ciudad son una fuerza de repulsión (Richardson, 1995).

De igual forma Glaeser and Gottlieb (2009) expresan que las ciudades son la consecuencia de un equilibrio espacial, y agregan que la aglomeración se refiere al proceso de concentración urbana motivada por las ganancias de productividad y las amenidades de consumo. En ese mismo sentido, Strange (2008) sugiere que la aglomeración espacial de trabajo y capital en ciudades sucede a través de dos formas, en primera instancia el clustering de la actividad industrial y en segunda instancia, el reagrupamiento de centros de trabajo de diversa índole.

En años recientes, desde China el término aglomeración urbana ha adquirido una connotación geográfica, centrada en las relaciones sinérgicas (económicas, sociales, administrativas) entre ciudades e indican que la aglomeración urbana es una forma espacial específica caracterizada por una alta integración funcional entre ciudades, que se encuentra vinculada a fenómenos socioeconómicos globales (Fang and Yu, 2017).

## **1.2. Economías de aglomeración**

En la literatura económica se reconoce la existencia de fuerzas que empujan a productores y consumidores a localizarse unos cerca de otros. La proximidad física entre agentes económicos permite que el trabajo y el capital sean más productivos, esas fuerzas se conceptualizan como economías de aglomeración, las cuales al generarse fuera de la firma e incluso fuera de la industria se consideran una forma de externalidad.

Las economías de aglomeración se refieren a las ganancias de productividad, rendimientos crecientes y reducciones de costos de interacción que surgen de una organización espacial densa y concentrada, simultáneamente son la fuerza que conduce esa concentración (Puga, 2010). Según Glaeser and Gottlieb (2009) pueden reconocerse tres conjuntos de teorías que explican ese fenómeno. Primero, se tiene la visión Marshalliana de las ventajas espaciales localizadas. Segundo, el planteamiento de la ciudad como ente dinamizador de ideas y conocimiento. Tercero, la idea de la proximidad como una fuerza que induce la concentración y polarización de la actividad económica según la Nueva Geografía Económica. Asimismo, se enfatizan

las restricciones que la propia escala urbana impone a la ciudad por la agudización de las deseconomías.

### **1.2.1. Economías de localización**

La noción de economías de aglomeración formulada por Marshall (1890) mantiene un enfoque de oferta y se sustenta en la idea de que la localización en proximidad física de un determinado número de empresas pertenecientes a una misma industria o sector de actividad propician un ambiente externo a la firma que alienta la productividad. La fuente de estas economías externas es el propio del sector, pues surgen de la especialización, en consecuencia, explican porqué actividades de una misma industria se aglutinan en una ciudad (Fujita et al., 1999; Rosenthal y Strange 2001; Puga, 2010).

1. Compartir insumos: gracias a la proximidad las firmas tienen acceso a la variedad y especialización que ofrecen otras empresas relacionadas a un menor costo de interacción en comparación a una ubicación distante.
2. Agrupación del mercado de trabajo: la formación de un mercado laboral especializado mejora la calidad y agilidad de los emparejamientos entre empleados y empleadores, lo cual implica menores costos de búsqueda y capacitación del capital humano requerido por las firmas.
3. Transmisión del conocimiento: la proximidad agiliza el flujo de ideas y conocimiento, agentes vecinos pueden aprender unos de otros, la interacción personal entre trabajadores del sector y la imitación entre firmas, conduce a mayores niveles de productividad debido al aprendizaje y la especialización.

### **1.2.2. Economías de urbanización**

Jacobs (1969) estableció que las ciudades elevan la productividad gracias a que diversifican y facilitan la transmisión de conocimiento entre los sectores, puesto que reagrupan una gama diferenciada de actividades económicas que responden a diversos tipos de industrias y consumidores, aunado a la multiplicidad de interacciones personales, el cruce de información e ideas, alienta la creación de actividades e innovaciones que no serían posibles en otro contexto (Strange, 2008). En este aspecto Rosenthal and Strange (2001) agregan que este tipo de economías se fortalecen con el tamaño de la ciudad.

En ese marco Glaeser and Gottlieb (2009) sostiene que la proximidad permite los spillovers de conocimiento estimulando el capital humano y la productividad, asimismo puntualiza que la diversidad geográfica y la competencia local impulsan la productividad. De igual modo, los consumidores se benefician por la diversidad que ofrecen las ciudades expresado en forma de amenidades de consumo, al mismo tiempo que una mayor densidad de empresas significa una mayor cantidad de centros de trabajo.

De la misma forma la presencia de instituciones políticas y sociales como las universidades y el gobierno contribuyen a la generación y difusión del conocimiento, propiciando un clima óptimo para la innovación tecnológica y el crecimiento económico. Estas externalidades se desbordan entre sectores y pueden asimilarse por los agentes económicos en general, en contraste con las economías de localización que son específicas a un sector (Frenken et al., 2007).

### **1.2.3. Nueva geografía económica (NGE)**

La nueva geografía económica surge de la teoría del comercio internacional y la geografía económica para explicar como la divergencia y la centralización geográfica de actividades económicas en pocos lugares es el resultado de rendimientos crecientes, las externalidades tecnológicas y pecuniarias, derivadas del comercio interregional bajo condiciones de mercados imperfectos, inmovilidad de los factores y costos de transporte. Estas fuerzas pueden ser centrípetas, es decir conducen a la aglomeración y las fuerzas pueden ser centrifugas, esto es llevan a la dispersión (Fujita and Thisse, 1996).

#### **Fuerzas centrípetas**

- Rendimientos crecientes: indivisibilidades y minimizar el costo fijo incentivan mayores escalas de producción a partir de un solo lugar.
- Externalidades: pecuniarias y tecnológicas de diversas fuentes como los spillovers de conocimiento y la infraestructura pública terminan por elevar la productividad de las firmas.
- Competencia espacial: bajos costos de transporte hacen de la competencia en precios algo inviable, así que las empresas tienden a diferenciarse y concentrarse en el espacio.

#### **Fuerzas centrifugas**

- Costos de transporte: los costos de transporte encarecen los precios de los productos anulando los beneficios de las economías de escala.
- Inmovilidad de factores: la causación circular y la divergencia no se explican sin la movilidad de factores.

### **Equilibrio espacial y causación acumulativa**

Fujita et al. (1999) afirman que la estructura espacial concentrada que prevalece en la realidad se debe a un tipo de equilibrio espacial logrado entre fuerzas centrípetas y fuerzas centrifugas que afectan las decisiones de localización de productores y consumidores. Fujita y Thiessse (2002) plantean los casos extremos:

1. En un extremo están los rendimientos crecientes a escala que son la fuente principal de las fuerzas de aglomeración, en presencia de estos últimos y en ausencia de costos de transporte todas las actividades estarían concentradas en un solo punto.
2. En contrapartida los costos de desplazamiento generan fuerzas de repulsión, de modo que en presencia de estos últimos y en ausencia de economías de escala todas las actividades se dispersarían.

De acuerdo con Krugman (1991) una vez que estas fuerzas interactúan aparece una divergencia centro- periferia. Al considerar que los bienes manufacturados predominan en las estructuras de consumo, que las economías de escala permiten una producción concentrada en pocos lugares, y los costos de transporte tanto de productores como de consumidores deben ser minimizados, las ciudades emergen como la localización preferente. En particular los vínculos hacia delante y atrás que se establecen a través del mercado refuerzan la concentración, ya que la disponibilidad de insumos y clientes atrae a los productores, mientras que altos salarios y oportunidades laborales captan a trabajadores y a su vez los consumidores se ven atraídos por y la disponibilidad de bienes y servicios. Por ende, estos lugares centralizan la producción y la población a expensas de regiones vecinas, ocasionando un modelo centro periferia y la divergencia regional.

### **Economías de aglomeración para la producción y el consumo**

Richardson (1995) hace notar que hogares y firmas se ven atraídos hacia las ciudades, pero las fuerzas que entran en acción en cada caso son distintas y destaca cuatro motivos:

1. El mercado de trabajo vincula espacialmente a consumidores y productores.
2. El juego entre ambos tipos de externalidades en grandes ciudades sugiere que las ciudades ofrecen buenas condiciones para el crecimiento económico, no así para la calidad de vida.
3. Respecto al tiempo, las externalidades de producción se diluyen mientras que las externalidades de consumo se profundizan.
4. En los países subdesarrollados las ciudades son menos productivas lo que sugiere una mayor importancia de las externalidades de consumo.

De acuerdo con Glaeser and Gottlieb (2009) las ciudades aglutinan firmas y familias debido a que es ahí donde confluyen superiores niveles de productividad del trabajo y el capital, con amenidades de consumo y la oferta de vivienda. En contraste con Richardson (1995) argumenta que las externalidades de producción son la fuerza primordial que origina y dirige la centralización espacial en las ciudades, mientras tanto las externalidades de consumo adquieren un carácter complementario.

### **1.3. Ciudad y urbanización**

Previamente se argumentó que la aglomeración tiene un carácter acumulativo, y es precisamente la acumulación progresiva de firmas y población lo que da origen a la ciudad, a su vez, la concentración sistemática en ciudades conduce el proceso de urbanización. Conviene hacer algunas precisiones conceptuales para evitar confusión o el uso inexacto de estos términos.

#### **1.3.1. Ciudad**

La ciudad puede ser entendida como el resultado de un equilibrio espacial de fuerzas centrifugas y centripetas (Fujita and Thisse, 1996); como puntos de concentración de la población (Tisdale, 1942); también como la ausencia de espacio entre agentes económicos (Glaeser and Gottlieb, 2009); o bien, usarse ciertos criterios para definirla, pueden ser de continuidad física del espacio construido, la magnitud de la población o la densidad poblacional de una área (Polèse and Rubiera, 2009), pero a fin de cuentas la ciudad es una forma específica de ocupar el espacio.

En ese sentido Parr (2007) ofrece la siguiente categorización multidimensional del fenómeno *ciudad* atendiendo diversas perspectivas:

- *La ciudad legal* se refiere a la definición legal de la ciudad, con los límites jurídicamente establecidos. Esta definición es ciertamente deficiente y poco funcional sobre todo en áreas urbanas donde la continuidad física de la ciudad ha desbordado dichos límites.
- *La ciudad de trabajo* esta definición resalta los vínculos y desplazamientos de los trabajadores desde su residencia hacia áreas económicas funcionales en otras palabras, refiere a la interacción entre la ciudad construida y su área de influencia, esto pone a la ciudad como el centro de una entidad más grande dentro de una relación que puede denominarse ciudad-región.
- *La ciudad construida* se centra en la noción física de la ciudad, responde correctamente al problema de las ciudades cuyo espacio construido excede los límites político administrativos y origina conurbaciones. Esta definición otorga importancia relativa de la ciudad como un foco de actividad económica y una concentración de la demanda de trabajo. Las fronteras establecidas por el criterio de ciudad construida fallan en abarcar aquellos vínculos funcionales entre la ciudad y su área de influencia que se expresan por ejemplo, en fuerza de trabajo que se desplaza continuamente desde los alrededores de la ciudad hacia la propia ciudad.
- *La ciudad de consumo* bajo esta consideración la ciudad es vista como el espacio donde residen los bienes y servicios demandados por la población ya sea que esta se encuentre dentro de sus límites o fuera de estos. Las ciudades pueden abastecer demanda exógena en la medida en que su especialización, jerarquía y costos de desplazamiento lo permitan.
- *La ciudad del empleo* dado que la mayoría de la fuerza laboral de la ciudad construida reside en ella misma y simultáneamente otras localidades mantienen una dependencia laboral con esa ciudad parece adecuado combinarlas para formar una ciudad más amplia. La dificultad con esta definición es incorporar la parte del empleo y de las actividades orientadas a lo local que se mantienen gracias al desplazamiento de estos trabajadores.
- *La ciudad de la fuerza laboral* comprende el territorio requerido para abastecer un volumen particular de empleo dentro de la ciudad construida, manteniendo cierto nivel de eficiencia.

### 1.3.2. Urbanización

Una de las primeras conceptualizaciones de la urbanización fue provista por Tisdale (1942), al establecer que la urbanización es un proceso de concentración de la población. Procede de dos maneras: la multiplicación de puntos de concentración y el aumento en el tamaño de las concentraciones individuales. Según esta definición la ciudad es consecuencia y no la causa de la urbanización, puesto que la urbanización implica pasar a diferentes ritmos de un estado de baja concentración hacia uno de más concentración. Además defiende esta definición diciendo que aunque es limitada previene de caer en ambigüedades.

Por su parte, Polèse and Rubiera (2009) concuerda con esa idea y añade que los fundamentos de la urbanización son esencialmente económicos. Explican que el proceso de urbanización es una consecuencia del desarrollo económico y se refiere a la transición de una sociedad rural a una sociedad urbanizada, tal proceso requiere de tres elementos fundamentales. Primero, un incremento sostenido del ingreso per cápita; segundo, una elasticidad ingreso menor a la unidad para los productos agrarios, lo que ocasiona una caída permanente de los productos agrarios dentro de la estructura de la demanda nacional en favor de las actividades económicamente urbanas, manufacturas, comercio y servicios; Tercero, la existencia de economías de aglomeración que empujan la formación de ciudades, y el crecimiento de la productividad tanto en la producción de bienes y servicios como en la dotación de servicios públicos, de modo que las ciudades se vuelven formas de organización espacial más ventajosas para las firmas y la población. Estos sucesos ocasionan un crecimiento más acelerado de la población en ciudades y un creciente peso relativo de la población urbana en comparación con la rural.

La conformación y consolidación de las economías urbanas regionales juegan un papel crucial en el crecimiento de los niveles de ingreso de las sociedades. En ese sentido, Annez and Buckley (2009) consideran que la urbanización es un paso necesario pero no suficiente para lograr el crecimiento económico de largo plazo. Indican que la resignación de recursos desde actividades rurales de baja productividad hacia actividades industriales y de servicios se refleja en una mayor renta per capita.

Con base en Berry (2008) la urbanización moderna responde al sistema de producción industrial urbano y sus transformaciones evolutivas. Señala que el crecimiento de las ciudades en el siglo XIX impulsaron una urbanización del mundo caracterizada por las relaciones

centro-periferia entre la ciudad y su área de influencia y al mismo tiempo estableció un orden jerárquico entre ciudades. En el siglo XX, la especialización de la industria y economías de aglomeración condujeron al crecimiento urbano hacia una nueva escala que desborda los límites de la ciudad. Las metrópolis son grandes áreas urbanas integradas en términos sociales y económicos, configuradas por medio de la profundización de los vínculos entre los centros de negocios, la manufactura y las zonas residenciales al interior de la ciudad y sus alrededores, asimismo representa los procesos de integración física y funcional con unidades territoriales próximas. Finalmente, los grandes continuos urbanos derivados de la fusión entre metrópolis conforman las megalópolis.

## **1.4. Deseconomías de aglomeración**

Las deseconomías de aglomeración son externalidades negativas derivadas de la saturación espacial de firmas y población que actúan como fuerzas centrifugas y por lo tanto imponen un límite a la aglomeración.

Richardson (1995) argumenta que las deseconomías se manifiestan con intensidad en las grandes ciudades y señala que pueden dividirse en dos clases. Por un lado, están las deseconomías pecuniarias, que son percibidas por los agentes privados a través del mercado en la forma de superiores rentas del suelo y costos de transporte. Por otro lado, están los costos sociales que abarcan problemas tales como contaminación del aire y elevadas tasas de criminalidad.

Kahn (2010) nos recuerda que las grandes concentraciones de actividades económicas y población causan males públicos como crimen y contaminación ambiental que debilitan las economías de aglomeración. Precisa que al igual que las ciudades, las deseconomías evolucionan en el tiempo y son sensibles a los fenómenos económicos, por ejemplo, la relocalización de la industria fuera de los distritos industriales tradicionales contribuyó a mejorar los niveles de contaminación en esas ciudades. Además, considera que los problemas de contaminación y crimen son cruciales para las grandes ciudades pues debilitan su capacidad de retener trabajo especializado y compromete su crecimiento a futuro.

Por su parte, Capello and Camagni (2000) agregan que estos problemas trascienden a la esfera del mercado laboral y desalientan la localización de las firmas. Verhoef and Nijkamp (2002) indican que la contaminación del medio ambiente por las actividades secundarias es una de los problemas más graves que enfrentan las ciudades pues reducen el bienestar de sus habitantes.

La idea de que las deseconomías están en función de la escala urbana ha sido analizada por varios autores. Alonso (1971) describió la idea de que, las ciudades alcanzan una escala a partir de la cual los beneficios de la aglomeración decrecen, en otras palabras, el costo marginal para la ciudad de nuevas firmas o población es mayor que el costo promedio. El tamaño óptimo de la ciudad, se encuentra cuando el producto marginal de un habitante (población) extra es igual a su costo marginal. Sin embargo, señaló que esto tal vez nunca ocurra pues el producto marginal de la ciudad es creciente, de tal forma que los costos marginales no sobrepasan a los beneficios.

Fujita et al. (1999) hacen notar que las compensaciones entre economías y deseconomías pueden modelarse en forma de U invertida, donde la utilidad de habitar una ciudad incrementa con el tamaño de la población hasta el punto en que las deseconomías se hacen más fuertes y la utilidad comienza decrecer. En contraste con la perspectiva explicada por Alonso (1971), esta concepción admite la posibilidad de múltiples equilibrios en cuanto al tamaño de las ciudades de acuerdo su especialización. La expansión urbana derivada de ese proceso implica mayores costos asociados a la congestión, como el transporte y la vivienda, la criminalidad y la contaminación, volviéndose una localización menos deseable para los agentes económicos por lo que se espera una dispersión desde el centro hacia su área de influencia (Combes et al., 2019).

En cambio, Henderson (1974) no solo considera el tamaño de la ciudad como la fuente las ineficiencias, añade que los problemas derivan de las externalidades negativas emanadas de la producción y el consumo, por las cuales nadie paga.

### **1.4.1. Contaminación del aire en las ciudades**

El espacio urbano es propenso a la contaminación debido a que las economías de aglomeración agrupan los mercados y densifican la actividad económica, en general, y porque el

funcionamiento de los mercados produce externalidades ambientales negativas, especialmente contaminación (Verhoef and Nijkamp, 2002). Henderson (1974) abunda en ese sentido, y explica que no existen los incentivos para que las firmas internalicen la contaminación, ya que, en una economía de mercado las empresas incurren en costos hasta el momento en que su producción es valorizada y vendida, pero eliminan sin costo sus desechos o emisiones en el aire.

Este problema es relevante pues la contaminación urbana está asociada a menores niveles de calidad de vida, problemas de salud y desamenidades, siendo las actividades humanas sobre todo aquellas orientadas a la producción y consumo la principal causa de contaminación en las ciudades, además la densidad poblacional está relacionada positivamente con niveles de contaminación superiores (Martínez-Bravo and Martínez-del Río, 2019).

La contaminación se presenta como un reto complejo, puesto que las ciudades demandan una enorme cantidad de recursos energéticos para sostener su funcionamiento, de modo que fábricas, vehículos, edificios y hogares emiten interminablemente contaminantes que degradan la calidad del aire. En ese aspecto Henderson (1977) considera que el espacio juega un papel crucial en la contaminación de las ciudades y resalta dos elementos. En primer lugar, la contaminación es consecuencia de la interdependencia espacial entre productores y consumidores. Segundo, la contaminación se genera en un punto para luego disiparse con la distancia.

En lo que respecta a las actividades manufactureras Cheng (2016) destaca las razones por las cuales la aglomeración es negativa para el medio ambiente. Primero, la concentración industrial estimula el crecimiento de la producción que a su vez eleva la demanda de energía y las emisiones contaminantes. Luego, las fuerzas de aglomeración suelen atraer a las firmas hacia paraísos de contaminación. Finalmente, la agrupación puede fomentar una conducta de parasito, profundizando la contaminación ambiental.

A diferencia de Cheng (2016), Glaeser and Kahn (2010) sostienen que son el transporte y las viviendas quienes contribuyen de manera significativa a las emisiones de efecto invernadero. Li et al. (2014) aceptan la relevancia de factores socioeconómicos pero argumentan que es el crecimiento económico en general es el factor explicativo de la contaminación del aire. Por su parte, Fang et al. (2015) indican que no solo las actividades secundarias son contribuidores importantes al deterioro del aire, sino que el papel de la urbanización es más amplio y abarca

fenómenos como la densidad poblacional, dispersión urbana, factores antropogénicos, la reducción de los espacios verdes entre otros. Algunas de las principales amenazas que enfrentan los habitantes de las ciudades derivados de la contaminación ambiental son el material particulado compuesto (PM), ozono (O<sub>3</sub>), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y monóxido de carbono (CO) (Martínez-Bravo and Martínez-del Río, 2019).

## **1.5. Revisión general sobre externalidades y los mercados**

### **1.5.1. Externalidades**

Al maximizar su utilidad o beneficio los consumidores y productores toman decisiones considerando únicamente los costos y beneficios propios sin tomar en cuenta el impacto de sus elecciones sobre el bienestar de otros. Cuando esas acciones afectan positiva o negativamente el bienestar de otro agente incumpliendo el óptimo de Pareto sucede una externalidad (Hanley et al., 1997; Tietenberg y Lewis, 2012). Para Varian (2014) la cuestión es que hay ciertos bienes para los cuales no existen mercados o los precios transmiten información incompleta a consumidores y productores ocasionando situaciones no eficientes en el sentido de Pareto, como consecuencia en los mercados involucrados se determinan niveles de producción y consumo por encima del óptimo social. Señala que una deficiente asignación de los derechos de propiedad origina las externalidades. En ese tenor Hanley et al. (1997) señalan que las economías de mercado están incompletas en vista de que no existen mecanismos de intercambio que permitan la compensación entre individuos causantes y receptores de externalidades.

#### **Clases de externalidades**

Las externalidades se manifiestan de diferentes formas e impactan de manera diferenciada a los agentes económicos, si se consideran los canales a través de los cuales operan es posible distinguir entre externalidades pecuniarias y externalidades no pecuniarias o tecnológicas.

#### **Externalidades pecuniarias y no pecuniarias**

Acorde con Tietenberg and Lewis (2016) la característica distintiva de los efectos externos del tipo pecuniario es que afectan a los agentes económicos a través del mercado, los precios

trasmiten la información a los agentes económicos de modo que pueden incorporar la nueva información al momento de maximizar sus decisiones de producción y consumo, es decir, los agentes económicos tienen la posibilidad de reasignar sus recursos, debido a esta cualidad se considera que las externalidades pecuniarias no ocasionan asignaciones ineficientes. Lo contrario ocurre con las externalidades no pecuniarias, pues al estar fuera del mecanismo de precios distorsionan los incentivos de individuos y empresas logrando situaciones socialmente ineficientes, la contaminación ambiental es un ejemplo claro de esta situación. Desde la perspectiva de Fujita and Thisse (1996) ambos tipos de externalidades son esenciales para entender la centralización geográfica de factores productivos. Por una parte, las externalidades no pecuniarias afectan a individuos y firmas por vías diferentes al mercado, esta circunstancia es entendida como “externalidades tecnológicas” y señalan que su relevancia reside en que inciden directamente en las funciones de utilidad y producción de los agentes económicos, el caso más ilustrativo es la difusión de conocimiento. Por otro lado, las externalidades pecuniarias se canalizan a través del mercado, como ahorros en costo de transporte y variaciones en la renta del suelo, derivadas de la proximidad entre agentes económicos.

### **1.5.2. La relación economía- medio ambiente**

Hanley et al. (1997) sostienen que economía y medio ambiente se encuentran vinculados por las actividades de producción y consumo. Señalan que, en esa relación el medio ambiente cumple papeles fundamentales. En primer lugar, es proveedor de recursos para el proceso productivo, en segundo lugar, es depósito de desechos originados por la actividad de mercado con una capacidad de absorción no inmediata y finita, esto aunado a la existencia de contaminantes acumulativos y conservativos que no son asimilados por la naturaleza generan serios problemas, y finalmente el medio ambiente constituye una amenidad socio cultural. Por su parte Nijkamp (1997) considera que las actividades económicas y la evolución del medio ambiente están relacionados por el espacio, en el sentido de que las externalidades ambientales se difunden a varias escalas geográficas en forma de spillovers. En esta relación el espacio se concibe como:

- El espacio como medio geográfico para las externalidades ambientales.
- El espacio es de naturaleza heterogénea en el cual las externalidades impactan de manera diferenciada.
- El espacio es un bien escaso para la sociedad

### **1.5.3. Leyes de la termodinámica**

La generación y absorción de contaminantes está determinada por las primeras dos leyes de la termodinámica en la medida en que la producción de bienes y su consumo involucran procesos físicos. Los bienes y servicios de consumo final son el resultado de una serie de transformaciones físicas que sufren los insumos en cada momento de la cadena productiva, mediante el uso de trabajo y capital. Cuando esos bienes van al mercado su precio refleja el valor añadido y sin considerar los costos sociales. Del trabajo se desprende que:

1. Ley de conservación de la materia: asegura que la materia y la energía no pueden crearse ni destruirse, es decir, que la generación de desechos es inherente a la transformación de materia durante la producción. Esto plantea que el stock de recursos y energía del planeta es fijo y al mismo tiempo que a una mayor utilización de recursos le corresponde un mayor nivel de desechos.
2. Ley de entropía: dice que la transformación de la materia sigue un flujo, una vez que la materia y la energía se transforman no es posible regresarlas a su estado primario, es decir al igual que el proceso productivo los procesos físicos van en un sentido, y los cambios son permanentes, una vez que los combustibles se convierten en energía no es posible retornarlos a su condición previa, lo importante es que esa cualidad impone límites a la capacidad de reciclaje.

### **Asignación del mercado y contaminación**

En las economías modernas la asignación de los recursos esta mediada por el mercado y es precisamente a través de los precios que los agentes de la oferta y la demanda obtienen información para interactuar en los mercados buscando maximizar sus excedentes. Lo que ocurre es que el precio solo refleja los costos privados, pero no los costos sociales, así desde el punto de vista social la eficiencia no implica un óptimo social.

La definición de los derechos de propiedad y la eficiencia del mercado están íntimamente ligados, siempre y cuando los derechos de propiedad aseguren, la exclusividad de los bienes (propietario recibe sus costos y beneficios), la transferibilidad, (de un propietario a otro) y la seguridad (no incautación de bienes), el mercado conduce a la eficiencia, de lo contrario resultados óptimos en el sentido de Pareto no están garantizados.

El inconveniente yace en la existencia de recursos con estructuras de propiedad difusas para los cuales su asignación es de acceso abierto, es decir no tienen propietario, tal situación expone a los denominados recursos comunes a la sobrexplotación, motivada por una deficiente transmisión de los costos de explotación (Tietenberg and Lewis, 2016).

Considerando a Hanley et al. (1997) cuando los agentes tienen acceso legal a un recurso que presenta la característica de rivalidad en consumo, los incentivos están puestos para que cada agente maximice el beneficio de ese bien en el menor tiempo posible. Explica que la no exclusividad provoca que el mercado falle al transmitir el verdadero costo de la escasez. En vista de que los bienes públicos carecen de exclusividad y rivalidad en consumo la asignación del recurso queda fuera del mercado, ya que el problema del *free rider* (los agentes se benefician de un bien sin pagar por él) desincentiva la actividad de mercado (Hanley et al., 1997). Los mercados competitivos no suministran las cantidades óptimas de un bien público, puesto que el fenómeno del *free rider* induce a los individuos a demandar más del bien y contribuir menos a su financiamiento (Tietenberg and Lewis, 2016). Cuando se modelan los efectos de las externalidades sobre la eficiencia de los mercados y la contaminación ambiental suele suponerse que existen solamente dos agentes económicos, uno causante de la externalidad y otro receptor, sin embargo, lo que se observa en la realidad es que numerosos agentes se encuentran espacialmente concentrados. Incluso en mercados competitivos una asignación eficiente no es alcanzable cuando se trata de recursos comunes y bienes públicos como la calidad del aire.

## **1.6. Evidencia empírica de las economías y diseconomías de aglomeración**

### **1.6.1. La existencia de las economías de aglomeración**

La literatura empírica, ha logrado confirmar la existencia y estimar la magnitud de las economías de aglomeración. Uno de los trabajos más relevantes pertenece a Ellison y Glaeser (1997) en el cual explican la concentración industrial de Estados Unidos por ventajas naturales, spillovers y un elemento aleatorio, mediante un índice de concentración industrial. Con ello comprueban empíricamente que las industrias tienden a concentrarse espacialmente más allá de lo que se esperaría si fuese un suceso aleatorio, aunque los niveles de aglomeración

varían de acuerdo a la industria.

Asimismo, utilizando dicho índice como variable representativa de la concentración manufacturera en Estados Unidos, Rosenthal and Strange (2001) estiman la importancia de las economías de aglomeración Marshallianas, a saber, *spillovers* de conocimiento, reagrupación del mercado de trabajo y la posibilidad de compartir proveedores, para diversos niveles geográficos. Encuentran que las variables asociadas al costo de transporte afectan positivamente la aglomeración a nivel estatal. Los *spillovers* se relacionan positivamente con la aglomeración a nivel código postal. La calificación de la fuerza laboral afecta positivamente la aglomeración a cualquier nivel de desagregación. Además, encuentran que los determinantes de la aglomeración son menos importantes para las nuevas empresas en comparación con las ya establecidas.

De igual forma Dauth (2013) corrobora que la industria en Alemania se encuentra concentrada y revela que los shocks externos que afectan el empleo, tales como la creación de nuevas fábricas persisten en el tiempo, lo cual apoya la teoría de las externalidades Marshallianas.

Glaeser and Gottlieb (2009) al considerar que existe movimiento de trabajadores entre ciudades, argumentan que el éxito urbano se refleja en una combinación de mayores salarios, precios más altos y mayores niveles de población. Por lo tanto, la elasticidad de la oferta de la vivienda determinará el impacto de shocks positivos sobre la población, precios y salarios. Asimismo, en su discusión de literatura detectan que la reducción de costos como criterio de localización es ahora más importante para los servicios que para las manufacturas. Mientras que la evidencia empírica sugiere que la difusión de información y la capacitación laboral son las variables que mejor predicen el éxito urbano, el cual se identifica con capacidad de atraer o retener factores productivos.

En ese sentido Moretti (2004) encuentra evidencia que sustenta el concepto Marshalliano de *spillovers* de conocimiento, al comparar la productividad y la escolaridad entre ciudades, es decir la dotación de capital humano esta correlacionado positivamente con productividad, mientras el capital físico fuera de la firma no tiene significancia, por lo que concluye que los altos niveles de productividad se deben a una mayor interacción entre trabajadores calificados. Asimismo, comprueba que los *spillovers* son sensibles a la distancia geográfica y económica.

Por otro lado, uno de los pocos trabajos cuyo interés explícito es evaluar los efectos económicos de la densidad pertenece a Ahlfeldt and Pietrostefani (2019) señalan que densidad y crecimiento de la ciudad no es lo mismo, sin embargo, varían conjuntamente de forma análoga, se trata de separar las externalidades que operan con la distancia de externalidades que operan desde la localización. Luego, estiman elasticidades con respecto al tamaño de la ciudad, enseguida llevan a cabo un meta-análisis a partir de 260 investigaciones del cual se desprende que incrementos en la densidad están correlacionados positivamente con los salarios, las rentas, un menor promedio en velocidad y distancias recorridas, menor uso del automóvil, mayor consumo energético, menor costo en la provisión de servicios públicos, mayores costos de construcciones y mayores brechas salariales y crimen.

Una explicación alternativa a la productividad de las ciudades ofrecida en el trabajo de Melitz and Ottaviano (2008) sostienen la idea de que el mercado expulsa a las firmas menos productivas y por lo tanto, en los mercados urbanos solo participan firmas más eficientes, de ahí los altos niveles de productividad en la ciudad. Contra ese argumento Combes et al. (2019), demostraron que las disparidades de productividad responden a la aglomeración. Por lo tanto, existe consenso sobre la existencia de las economías de aglomeración. Sin embargo, se tiene poco conocimiento sobre los canales a través de los cuales operan las economías de aglomeración y segundo, sus externalidades negativas (Puga, 2010).

## **1.6.2. Los costos de la aglomeración**

### **Costos pecuniarios de las ciudades**

Con respecto al tamaño de la ciudad y con un enfoque de sistema, Henderson (2002) exhibió que el sobredimensionamiento de las ciudades del sistema urbano tiende a reducir el bienestar de ciudades de menor jerarquía, al absorber una proporción mayúscula de la inversión pública, al mismo tiempo que los costos de vida de habitar grandes ciudades afecta la calidad de vida. Para lograrlo estima como el crecimiento de la población y concentración urbana afectan el costo de vida, medido como función del ingreso nacional y la calidad de vida urbana que considera aspectos de salud, educación y dotación de servicios básicos.

Enfocándose en las emisiones asociadas al dióxido de carbono procedente del consumo que realizan los hogares al conducir en la ciudad, usar transporte público, calefacción de

viviendas y consumo de energía eléctrica respecto a las nuevas construcciones en Estados Unidos, (Glaeser and Kahn, 2010). Encontraron una fuerte asociación negativa entre emisiones y regulaciones del uso de la tierra sobre todo en las áreas más limpias, lo cual parece orientar las nuevas edificaciones hacia lugares más contaminados. Concluyen que mayores niveles de densidad pueden reducir las emisiones en lugares donde predominan climas templados.

Por su parte, Combes et al. (2019) abordaron la cuestión de los costos urbanos comprendidos en el precio de la tierra y la vivienda, así como el gasto que realizan las familias para diferentes escalas urbanas dentro de los municipios. El desarrollo del modelo que guía dicha investigación sigue la siguiente lógica, los hogares eligen en que ciudad vivir, luego en que parte de la ciudad residir, en seguida toman sus decisiones de consumo en la localización elegida. Para su interpretación es fundamental la elasticidad de los costos urbanos respecto al nivel de población, manteniendo constante la utilidad de las familias. En línea con la teoría, corroboran que la elasticidad de los costos aumenta con el tamaño de la ciudad, adicionalmente encuentran que los ajustes de la oferta de la vivienda en relación con el crecimiento poblacional reducen la magnitud de las elasticidades.

### **Costos ambientales (externalidades no pecuniarias)**

Alejándose de las externalidades medidas por el mercado y en temas de índole ambiental, Cho and Choi (2014) tomaron en cuenta la distribución espacial de los contaminantes resultado de un incremento en la densidad y la dispersión de los contaminantes asociados al incremento de los espacios verdes, mostraron que la concentración de las emisiones no necesariamente incrementa los niveles de contaminación. No hallaron evidencia que sugiera una relación clara entre desarrollo urbano compacto y la calidad del aire en las ciudades, más bien este último está asociado a las características específicas del contaminante y la fuente de emisión. La literatura revisada enfoca su atención en la magnitud y las causas de la aglomeración, ahora bien, el crecimiento continuado de las megaciudades sin un límite pone en evidencia las ventajas de la concentración, el problema es que altas concentraciones profundizan los costos sociales como la degradación del medio ambiente.

Desde la perspectiva de las economías de aglomeración estos estudios han prestado poca atención a las externalidades ambientales porque no se sancionan dentro del mecanismo de mercado. La mayoría de la literatura ignora las características espaciales de la aglomeración y

los impactos de las externalidades entre regiones vecinas, si esas externalidades exhiben patrones espaciales, entonces las estimaciones realizadas con técnicas econométricas no espaciales sufren de problemas de endogeneidad, en consecuencia, las estimaciones serán inconsistentes. En respuesta, otra rama de la literatura emplea técnicas de econometría espacial para modelar explícitamente las correlaciones regionales, estos modelos son más complejos que los modelos lineales no espaciales al expandir el conjunto de información contenido en los estimadores. Asimismo, dado la dependencia espacial, esta literatura reconoce tanto la aglomeración o clustering de la actividad económica, la cual ocurre para cualquier nivel de desagregación geográfica, al mismo tiempo que identifica *spillovers* dentro y entre las ciudades (LeSage, 2008).

En ese sentido Gong et al. (2019) encontraron que la economía de las aglomeraciones urbanas está correlacionada positivamente con la propia escala urbana, así como la presencia y proximidad de ciudades cercanas, al aplicar un modelo espacial de efectos fijos. Según sus hallazgos la aglomeración de ciudades genera un efecto de sinergia que conduce a mayores niveles de productividad y salarios. En lo que respecta a la relación entre aglomeraciones y medio ambiente, Qian et al (2013) establecen que el nivel de desarrollo, la densidad de población y la aglomeración industrial tienen una relación significativa con las emisiones contaminantes por dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y demanda química de oxígeno (COD). En vista de que existe correlación espacial, permitir la dependencia espacial en el modelo mejora las estimaciones. Encontraron que a los municipios económicamente más desarrolladas les corresponde mayores niveles de contaminación, mientras que áreas menos desarrolladas y más dispersas se encuentran menos contaminadas.

Li et al. (2014) examinaron la relación entre las emisiones contaminantes y el crecimiento económico, aplicando un modelo espacial del error (SEM). Los resultados obtenidos muestran que el nivel de desarrollo económico, la población y las industrias secundarias contribuyen a generar más azufre y elevar la demanda química de oxígeno.

De manera semejante Fang et al. (2015) examina la relación entre el índice de urbanización y el índice de calidad de aire el cual contiene varias sustancias contaminantes como el monóxido de carbono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno entre otros, para 289 ciudades Chinas empleando un modelo autorregresivo espacial (SAR). Como resultado obtuvo que la población, la tasa de urbanización, la densidad del automóvil y la proporción de la industria secundaria tuvieron una influencia significativa sobre la calidad del aire. Además, con ayu-

da de los indicadores LISA se identificaron los clústeres de contaminación, de modo que se observa autocorrelación espacial global y local.

Liu et al. (2017) estudiaron la incidencia de factores socioeconómicos y naturales sobre la concentración de contaminantes aéreos, por medio de un modelo espacial de Durbin (SDM). Encontraron que las áreas más contaminadas se encuentran en aglomeraciones urbanas, también descubrieron *spillovers* originados por el tráfico vehicular. Por otro lado Cheng et al. (2017) analizan los factores que contribuyen al crecimiento del material particulado  $PM_{2.5}$  usando un panel espacial dinámico. Los resultados muestran que la industria secundaria, el uso del carbón como fuente de energía, la aglomeración de la población y la densidad del automóvil explican el aumento en la concentración aérea de estas partículas.

## Conclusiones del capítulo

En este capítulo se presentaron las teorías de la aglomeración subrayando que la organización espacial de la actividad económica exhibe patrones de aglomeración. Además, se describió como las actividades de producción y consumo se encuentran ligadas con la degradación ambiental, de modo que es coherente plantear que la contaminación por emisiones se encuentra espacialmente autocorrelacionada y da lugar a conglomeraciones.

Para ese fin se expusieron las principales teorías en la materia, las cuales sostienen que la aglomeración comprende al menos tres dimensiones. En primer lugar, la conformación de *clusters* industriales; segundo, la concentración geográfica de empresas de diferentes sectores, trabajadores y consumidores en las ciudades; tercero, la agrupación y vinculación funcional entre ciudades próximas entre sí.

En ese sentido, el funcionamiento de las ciudades exige desplazamientos continuos de la fuerza de trabajo desde los lugares de residencia hacia los centros de trabajo, asimismo, requiere que consumidores, insumos y bienes finales se trasladen hacia los puntos de venta o transformación. Por lo tanto las ciudades no son estáticas ni autosuficientes, se encuentran integradas en una relación de interdependencia con su área de influencia y con otras ciudades. Al respecto, en este capítulo se argumentó que todas esas relaciones funcionales se encuentran mediadas por el mercado y se detalló que su funcionamiento normal conduce a la degradación del medio ambiente, pues los precios no pueden transmitir los costos sociales de las acciones de los agentes privados.

La evidencia empírica ha demostrado que existen las economías de aglomeración y se pueden constatar con base en diferentes variables como el empleo o los salarios. Además, la evidencia en torno a la relación entre la aglomeración y la degradación del medio ambiente también se ha constatado. Investigaciones sustentadas en técnicas de econometría espacial han identificado que la contaminación tiende a concentrarse en el espacio influenciado por variables socioeconómicas e inclusive tiende a difundirse hacia regiones vecinas. Estos estudios son relativamente nuevos y se encuentran en una etapa de desarrollo, los resultados que han obtenido hasta ahora son interesantes y novedosos.

## CAPÍTULO 2

### METODOLOGÍA Y DATOS

A lo largo de las últimas décadas, la ciencia económica reconoció que el espacio no es neutro, sino que juega un papel crucial en la determinación de los procesos económicos, es así que la economía urbana y la geografía económica se han consolidado como campos analítico formales dentro de la economía. Asimismo, la econometría espacial se ha configurado como una metodología especializada en el manejo de variables y datos espaciales, que son esenciales para analizar fenómenos que se encuentran dentro del campo de la economía regional aplicada, o bien dentro de la economía ambiental.

En ese sentido, en este apartado metodológico se hace una síntesis de las técnicas implementadas en el análisis espacial, las cuales comprenden los indicadores de asociación espacial global y local, las matrices de pesos espaciales, el proceso autorregresivo, y los diferentes modelos de regresión espacial tales como el modelo de rezago espacial (SAR), modelo del error espacial (SEM), el modelo espacial general (SAC), modelo con rezago espacial en las variables explicativas (SLX) y el modelo espacial de Durbin (SDM). Además se describe el proceso de selección del modelo mediante las pruebas del multiplicador de Lagrange.

En el apartado de datos se introducen las variables de interés, la asignación de acrónimos a cada una de ellas junto con una breve justificación. También se detallan las fuentes de información de los datos crudos y en su caso, las ecuaciones usadas para la construcción de las variables. En seguida se presenta la estadística descriptiva de las variables y la visualización espacial de los datos mediante mapas temáticos.

## 2.1. Metodología

### 2.1.1. Autocorrelación espacial

De acuerdo con Anselin (1988) con frecuencia los modelos y datos en los estudios de sección cruzada y panel de datos aplicados en economía urbana y regional deben lidiar con lo que él denominó efectos espaciales, los cuales se dividen en dos tipos. Por un lado, la heterogeneidad espacial refleja que el espacio no es homogéneo y por ende los fenómenos económicos varían de un lugar a otro, tal situación ha sido atendida en buena medida por técnicas de econometría tradicional. Por otro lado, la dependencia espacial ha impulsado notablemente el desarrollo de la econometría espacial como subcampo de la econometría.

Desde la perspectiva de la ciencia regional Elhorst (2003) sostiene que la dependencia espacial surge porque el comportamiento económico de las personas varía en el espacio según las condiciones del mercado local en comparación con las condiciones de mercado en otras regiones y de acuerdo con la distancia entre las regiones.

Según LeSage (2008) también considera que los datos obtenidos de regiones o puntos en el espacio tienden a parecerse a aquellos colectados en lugares cercanos. Esa situación obedece a la dependencia espacial, este es un concepto clave en la econometría porque contradice el supuesto de independencia entre las observaciones aplicado comúnmente al análisis de sección cruzada y panel de datos. Cuando dicho supuesto no puede sostenerse los análisis tradicionales arrojarán resultados sesgados.

El concepto de dependencia espacial o autocorrelación espacial se basa en la primera ley de la geografía de Tobler, la cual establece que todas las cosas están relacionadas entre sí, pero las cosas más cercanas en el espacio se encuentran más relacionadas y tienen mayor similitud en comparación con las distantes (Anselin, 1988). La autocorrelación espacial refleja el grado en que uno o más valores observados en una localización  $i$  (puntos o áreas), están condicionados por valores observados en localizaciones vecinas  $j$  (LeSage, 2008).

Anselin (2013) señala que la dependencia espacial proviene de dos fuentes. Primero, de errores de medición sobre unidades espaciales contiguas, por ejemplo mediciones agregadas

que se desprenden de unidades espaciales más desagregadas; segundo, de los procesos de interacción espacial descritos por la teoría regional. Además, puntualiza que la dependencia espacial puede identificarse con un solo corte en el tiempo, pero también puede incorporarse al análisis con panel de datos.

### 2.1.2. Matrices de pesos espaciales

El hecho de que las observaciones en un lugar se encuentren estrechamente relacionadas con lo que sucede en lugares próximos conduce a la noción de vecindad y al uso de matrices para representar las conexiones entre unidades espaciales. Cuando las unidades espaciales se encuentran en un mapa se dice que existe una relación de vecindad si comparten alguna frontera o si cumplen algún criterio de distancia (Anselin, 1988).

Las matrices de pesos espaciales denotadas por  $W$  se construyen a partir de matrices binaria donde las  $n$  unidades espaciales ya sean ciudades, regiones o algún tipo localización, se encuentran representadas por una fila y una columna, de modo que  $W$  es de tamaño  $N \times N$ . Considerando las unidades espaciales  $i$  y  $j$  se tiene que el elemento  $w_{ij} = 1$  cuando  $i$  es vecino de  $j$  y  $w_{ij} = 0$  cuando no existe vecindad. Generalmente los elementos de la diagonal principal son iguales a cero para evitar que una región sea su propio vecino (Anselin, 2001).

La matrices  $W$  se estandarizan por filas al dividir todos los elementos de la matriz entre el número de vecinos, de manera que la suma de las filas es igual a la unidad ( $\sum_j w_{ij} = 1$ ), de esta forma se obtienen matrices de ponderadores espaciales. Al asociar  $W$  con un vector correspondiente a la variable de interés resulta en el operador de rezago espacial, el cual expresa la forma en que esa variable se relaciona con el resto de unidades espaciales del sistema que se encuentra bajo estudio y de esa manera se incorpora a los modelos de regresión espacial (Anselin, 2001). El operador de rezago espacial se define como:

$$[Wy]_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} \cdot y_j \quad (2.1)$$

en forma matricial

$$Wy \quad (2.2)$$

### 2.1.3. Indicadores de autocorrelación espacial global

De acuerdo con Anselin (2013) la dependencia espacial es un caso especial en los cortes transversales puesto que surge cuando la correlación entre unidades transversales es distinta de cero, y además esas correlaciones siguen un cierto orden espacial, lo anterior se puede expresar formalmente por la condición:

$$cov[y_i y_j] = E[y_i y_j] - E[y_i] \cdot E[y_j] \neq 0, \text{ para } i \neq j$$

donde  $i, j$  son las localizaciones y  $y_i(y_j)$  son los valores de la variable de interés.

Una forma aproximada o intuitiva de evaluar la presencia de correlación espacial se realiza al examinar la distribución espacial de los datos mediante mapas temáticos, también hay pruebas estadísticas formales para corroborar la presencia de dependencia espacial global. De acuerdo con Anselin (2001) y Ord and Getis (1995) el test *I de Moran* es una de las pruebas mas robustas que se tienen para probar la dependencia espacial. Formalmente su expresión matemática es:

$$I \text{ de Moran} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{i \neq j}^n w_{ij}} \quad (2.3)$$

$$Z = \frac{I - E(I)}{\sqrt{VAR(I)}} \quad (2.4)$$

donde  $n$  es el número de municipios;  $x_i, x_j$  son los valores de una localización  $i, j$ ;  $W_{ij}$  es la matriz de ponderadores espaciales; y  $S$  denota la desviación estándar en los datos.

El *I de Moran* toma valores en el intervalo  $(-1, 1)$ , si  $I \approx -1$  se tiene dispersión perfecta, por el contrario si  $I \approx +1$  hay correlación perfecta, un  $I = 0$  indica que el patrón espacial es aleatorio. Luego, se utiliza una distribución de  $Z$  para el contraste de la prueba de hipótesis donde:  $H_0$  : *no dependencia espacial*. Así como el estadístico  $Z$  que se utiliza para probar la significancia de la autocorrelación espacial.

El *I de Moran* mide la dependencia espacial global, es importante centrar la atención en el signo del coeficiente de autocorrelación espacial y su significancia estadística. Un coeficiente de autocorrelación positivo y significativo indica que valores similares tienden a concentrarse más de lo que se esperaría si obedeciera un proceso aleatorio. Un coeficiente autocorrelación espacial negativo sugiere la existencia de un patrón espacial más heterogéneo en comparación con un proceso aleatorio. Además, la magnitud del coeficiente indica la intensidad de la autocorrelación espacial (LeSage, 2008).

## 2.1.4. Autocorrelación espacial local

### Indicadores de asociación espacial local

Los indicadores de asociación espacial local (*LISA*) propuestos por Anselin (1995) permiten, primero descomponer el *I de moran global* en las aportaciones de cada localización; segundo, permite evaluar la asociación espacial local alrededor de una localización específica, es decir, prueba si el valor observado en cierta localización es más similar a sus vecinos inmediatos de lo que sería aleatoriamente. Esta técnica es apropiada para identificar el *clustering* de fenómenos en el espacio y visualizarlos mediante *puntos calientes*, valores altos y positivos del estadístico  $I_i$  indican asociación espacial de valores similares (en este caso, municipios en regiones alto-alto y bajo-bajo) y valores negativos indican asociación entre valores disímiles (municipios en regiones bajo-alto y alto-bajo).

El *I de Moran local* se puede expresar formalmente de la siguiente manera:

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{m_0} \sum_j w_{ij}(x_j - \bar{x}), \quad m_0 = \sum_i (x_i - \bar{x})/n \quad (2.5)$$

donde  $X_i$  es el valor de  $x$  en la localización  $i$ ,  $\bar{x}$  es la media de los valores de  $x$ ,  $w_{ij}$  es el peso espacial entre las localizaciones  $i$  y  $j$ .

### Estadístico *G*, de Getis y Ord

Los *G* de Getis son una familia de estadísticos usados para detectar clústers espaciales conocidos como *hot spots* o puntos de calor, los cuales usan la hipótesis nula de no dependencia espacial. Como afirman Ord and Getis (1995) el estadístico mide el grado de asociación que

resulta de la concentración de puntos ponderados (o área representada por un punto ponderado) y todos los demás puntos ponderados incluidos dentro de un radio de distancia  $d$  desde el punto ponderado original. Así pues existe un  $G_i$  asociado a cada polígono  $i$ . El estadístico se define como:

$$G_i(d) = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij}(d)x_j}{\sum_{j=1}^n x_j}, \quad j \neq i, \quad (2.6)$$

donde  $w_{ij}$  son los elementos en una la matriz de ponderadores espaciales, el numeradores es la suma de todas las localizaciones  $x_j$  dentro de la distancia  $d$  excluyendo a  $x_i$ .

Una de las propiedades favorables del estadístico es que no sesga los resultados cuando la matriz de ponderadores espaciales abarca zonas con alta densidad de puntos de datos, puesto que identifica la correlación espacial cuando los valores  $x_j$  (vecinos del punto  $i$ ) difieren sistemáticamente de la media (Ord and Getis, 1995).

El Estadístico  $G$  conceptualiza de diferente manera la asociación espacial local en comparación con los *LISA*, por ejemplo, cuando  $G$  toma valores positivos indica la asociación espacial de valores altos y cuando toma valores negativos indican asociación espacial de valores bajos. Por otra parte, cuando los *LISA* toman valores positivos sugieren asociación espacial de valores similares ya sean altos o bajos y valores negativos implican la asociación espacial de valores que difieren (Anselin, 1995).

Por lo tanto no pueden entenderse como sustitutos más bien como indicadores complementarios que al emplearse de manera conjunta incrementan la comprensión de los fenómenos de asociación espacial local expresados en forma de clústers, y que pasan inadvertidos a la vista de los estadísticos globales (Ord and Getis, 1995).

### 2.1.5. El proceso autorregresivo

Cuando el supuesto clásico de independencia entre las observaciones no se satisface es necesario especificar la estructura de dependencia entre las  $n$  unidades de observación que

conforman la muestra de datos de tamaño  $n$ , tal situación se solventa al añadir un rezago espacial al modelo (LeSage and Pace, 2009).

La presencia de dependencia espacial indica que la influencia del espacio es tan fuerte que de no ser considerada las estimaciones pueden sesgarse, en ese sentido el rezago espacial se incorpora para reflejar la difusión espacial con fricción a la cual se encuentran sujetos los fenómenos económicos (LeSage, 2008). De ahí que la especificación del modelo exige la incorporación de un proceso espacial autorregresivo en la variable dependiente o en el término de error, de lo contrario los estimadores obtenidos serán inconsistentes (Elhorst, 2003).

De acuerdo con LeSage and Pace (2009) la forma matemática de la estructura de dependencia se expresa así:

$$y = \alpha\iota + \rho Wy + \varepsilon \quad (2.7)$$

$$y = (I_n - \rho W)^{-1}\alpha\iota + (I_n - \rho W)^{-1}\varepsilon \quad (2.8)$$

donde  $\rho$  es un parámetro escalar conocido como coeficiente autorregresivo y  $W$  es una matriz de pesos espaciales de tamaño  $n \times n$ .

### 2.1.6. Modelos de regresión espacial

Los modelos de regresión espacial son los más adecuados cuando los datos exhiben heterogeneidad espacial y/o dependencia espacial (lo cual implica incumplir los supuestos clásicos de MCO) esta última se incorpora en los modelos mediante la agregación de un rezago espacial. Los modelos espacial autorregresivo (SAR), modelo de error espacial (SEM), modelo espacial general (SAC), modelo espacial de Durbin (SDM) pueden capturar la dependencia de fuentes endógenas y exógenas y además producen coeficientes insesgados (LeSage and Pace, 2009).

### Modelo de mínimos cuadrados ordinarios (MCO)

Los mínimos cuadrados ordinarios son uno de los métodos de estimación más frecuentes en la econometría, cuando se cumplen los supuestos clásicos los MCO producen los mejores

estimadores lineales e insesgados. La ecuación que describe al modelo de regresión es:

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$$

donde  $y$  es un vector  $n \times 1$  de observaciones de la variable dependiente;  $X$  es una matriz  $n \times k$  de observaciones de las variables explicativas con sus parámetros  $\beta$  asociados;  $\varepsilon$  es un vector  $n \times 1$  de perturbaciones no observables.

## Modelo espacial autorregresivo (SAR)

Este tipo de modelos consideran un proceso autorregresivo en la variable dependiente donde  $\rho$  es el parámetro que mide la fuerza de la dependencia espacial. Estos modelos analizan como el promedio de la variable endógena en las regiones vecinas más un grupo de variables exógenas inciden en las variaciones de  $y$  a través de las regiones.

De acuerdo con LeSage and Pace (2009) las ecuaciones que describen al modelo son:

$$y = \rho W y + \alpha \iota_n + X\beta + \varepsilon \quad (2.10)$$

El proceso generador de datos:

$$y = (I_n - \rho W)^{-1}(\alpha \iota_n + X\beta) + (I_n - \rho W)^{-1}\varepsilon$$

$$\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$$

donde  $y$  es un vector  $n \times 1$  de observaciones de la variable dependiente;  $X$  es una matriz  $n \times k$  de observaciones de las variables explicativas con sus parámetros  $\beta$  asociados;  $\varepsilon$  es un vector  $n \times 1$  de perturbaciones no observables;  $\rho$  es el parámetro autorregresivo;  $\iota_n$  es un término constante conformado por un vector de unos.

Cuando  $\rho \neq 0$  lo que sucede en una región  $i$  se difunde al resto de regiones vecinas, luego esas variaciones repercuten devuelta en la región  $i$  de tal modo que las variaciones en la variable dependiente son resultado de influencias locales (directas) e influencias vecinas (indirectas), fenómeno que se denomina como *spillover* espacial. Debido a los efectos de interacción endógenos entre regiones, la interpretación de los coeficientes no es directa, requiere estimar impactos directos e indirectos.

## Modelo espacial del error (SEM)

Cuando la dependencia espacial no se encuentra en la variable dependiente se utiliza este tipo de modelos donde el proceso autorregresivo se encuentra en los errores. La dependencia espacial residual obedece a la omisión de variables no esenciales o debido a errores de medición que son captadas por el término de error. Siguiendo a LeSage and Pace (2009) las ecuaciones del modelo son:

$$y = \alpha \iota_n + X\beta + u \quad (2.11)$$

El proceso generador de datos:

$$u = \lambda Wu + \varepsilon$$

$$\varepsilon \sim N(0, \sigma^2 I_n)$$

donde  $y$  es un vector  $n \times 1$  de observaciones de la variable dependiente;  $X$  es una matriz  $n \times k$  de observaciones de las variables explicativas con sus parámetros  $\beta$  asociados;  $\varepsilon$  es un vector  $n \times 1$  de perturbaciones no observables;  $\lambda$  es el parámetro autorregresivo;  $\iota_n$  es un término constante conformado por un vector de unos.

Los coeficientes estimados pueden interpretarse como derivadas parciales de la misma manera que se hace en MCO, dado que no hay un proceso endógeno como en el modelo SAR.

## Modelo espacial autorregresivo combinado (SAC)

Este modelo considera la dependencia espacial presente en la variable dependiente y en las perturbaciones. Según LeSage and Pace (2009) las ecuaciones del modelo son:

$$y = \alpha \iota_n + \rho W_1 y + X\beta + u \quad (2.12)$$

$$u = \theta W_2 u + \varepsilon$$

El proceso generador de datos:

$$y = (I_n - \rho W_1)^{-1}(X\beta + \alpha \iota_n) + (I_n - \rho W_1)^{-1}(I_n - \theta W_2)^{-1}\varepsilon \quad (2.13)$$

donde  $y$  es un vector  $n \times 1$  de observaciones de la variable dependiente;  $X$  es una matriz  $n \times k$  de observaciones de las variables explicativas con sus parámetros  $\beta$  asociados;  $\varepsilon$  es un vector

$n \times 1$  de perturbaciones no observables;  $\rho$  y  $\theta$  son parámetros autorregresivos;  $\iota_n$  es un término constante conformado por un vector de unos.

El modelo SAC es equivalente a los modelos espaciales autorregresivos de media móvil (SARMA), ambos modelos se han propuesto para capturar efectos globales y locales. Debido al proceso autorregresivo endógeno, los coeficientes estimados por este modelo no son directamente interpretables, por lo tanto se requiere estimar los impactos directos e indirectos

### Modelo de rezago espacial en X (SLX)

Cuando se considera que las características de las regiones vecinas pueden influir en fenómenos locales y suele emplearse un rezago espacial de las variables exógenas  $WX$  de manera que las variaciones en la variable dependiente se determinan por las características locales y las características de regiones vecinas. Acorde a LeSage and Pace (2009) las ecuaciones de este modelo son:

$$y = \alpha \iota_n + X\beta_1 + WX\beta_2 + \varepsilon \quad (2.14)$$

$$\varepsilon \sim N(0, \sigma^2 I_n)$$

EL modelo SLX no contiene procesos autorregresivos en consecuencia no requiere de econometría espacial y puede ser estimado de forma correcta con MCO. Los coeficientes pueden interpretarse directamente como derivadas parciales.

### Modelo espacial de Durbin (SDM)

Este modelo contiene rezagos espaciales tanto en la variable dependiente como en las variables explicativas. En este modelo es empleado para capturar *spillovers* entre regiones vecinas.

Con base en LeSage and Pace (2009) las ecuaciones que describen al modelo son:

$$y = \rho Wy + \alpha \iota_n + X\beta + WX\gamma + \varepsilon \quad (2.15)$$

El proceso generador de datos:

$$y = (I_n - \rho W)^{-1}(\alpha \iota_n + X\beta + WX\gamma + \varepsilon)$$
$$\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$$

donde  $y$  es un vector  $n \times 1$  de observaciones de la variable dependiente;  $X$  es una matriz  $n \times k$  de observaciones de las variables explicativas con sus parámetros  $\beta$  asociados;  $\varepsilon$  es un vector  $n \times 1$  de perturbaciones no observables;  $\rho$  es el parámetro autorregresivo y  $\gamma$  es el parámetro de rezago espacial de las variables explicativas;  $\alpha \iota_n$  es un término constante conformado por un vector de unos.

Dado los rezagos espaciales en la variable endógena y exógenas, cualquier variación en alguna de ellas para determinada región dará lugar a efectos de retroalimentación, lo cual impide que los coeficientes del modelo sean directamente interpretables. Por lo tanto, al igual que el SAR la interpretación de los coeficientes requiere la estimación de efectos directos e indirectos.

El modelo SDM es más conveniente que los modelos SAR, SEM y SAC pues la dependencia espacial exagera el sesgo por variable omitida, en la variable dependiente, independiente y en los residuos, de tal forma que el los procesos generadores de datos del SAR, SEM y SAC producen estimadores sesgados, en cambio el SDM produce coeficientes insesgados. Además, los efectos indirectos del SDM son más adecuados para estimar *spillovers* espaciales ya que considera efectos endógenos y exógenos de forma simultánea (LeSage and Pace, 2009).

## 2.1.7. Interpretación de los modelos SAR, SAC y SDM

### Impactos directos e indirectos

En MCO los coeficientes tienen una interpretación directa como derivados parciales,  $\frac{\delta y_i}{\delta x_{ir}} = \beta_r$ ; y  $\frac{\delta y_i}{\delta x_{jr}} = 0$  para todo  $j \neq i$ . Gracias a la independencia entre las observaciones, las variaciones de la variable dependiente en la región  $i$ , esto es  $y_1$  son explicadas por las variables exógenas de la propia región, mientras que las variables exógenas de la región  $j$  no afectan a  $y_i$ . En cambio, en los modelos de regresión espacial los coeficientes son más complejos pues contemplan la información que aportan las variables exógenas de la región misma y de regiones vecinas, es posible que  $\frac{\delta y_i}{\delta x_{jr}} \neq 0$  (LeSage and Pace, 2009).

La introducción de rezagos espaciales en variables explicativas para el caso del SDM implican que  $\frac{\delta y_i}{\delta x_{jr}} = S_r(W)_{ij}$  que es el efecto directo, es decir, un cambio en la observación  $j$  ejerce un efecto en el resto de regiones. La introducción del rezago espacial en la variable dependiente para el caso del SAR y SDM implica efectos de retroalimentación:  $\frac{\delta y_i}{\delta x_r} = S_r(W)_{ii}$  que es el efecto indirecto, un cambio en la observación  $i$  ejerce un efecto en  $j$  que a su vez influye de regreso en  $i$ . De modo que la magnitud de los efectos esta condicionada la posición geografica de las regiones las conexiones denotadas por matriz de pesos espaciales en conjunto con los coeficientes de correlación espacial (LeSage and Pace, 2009).

Ante esa complejidad LeSage (2008) propone utilizar medidas resumen de los impactos. Por un lado el efecto promedio directo, dice como un cambio en determinada variable explicativa en en  $i$  afecta la variable dependiente en  $i$  considerando efectos de retroalimentación. Por otro lado, los efectos indirectos miden la respuesta de la variable dependiente en  $i$  ante variaciones en regiones vecinas.

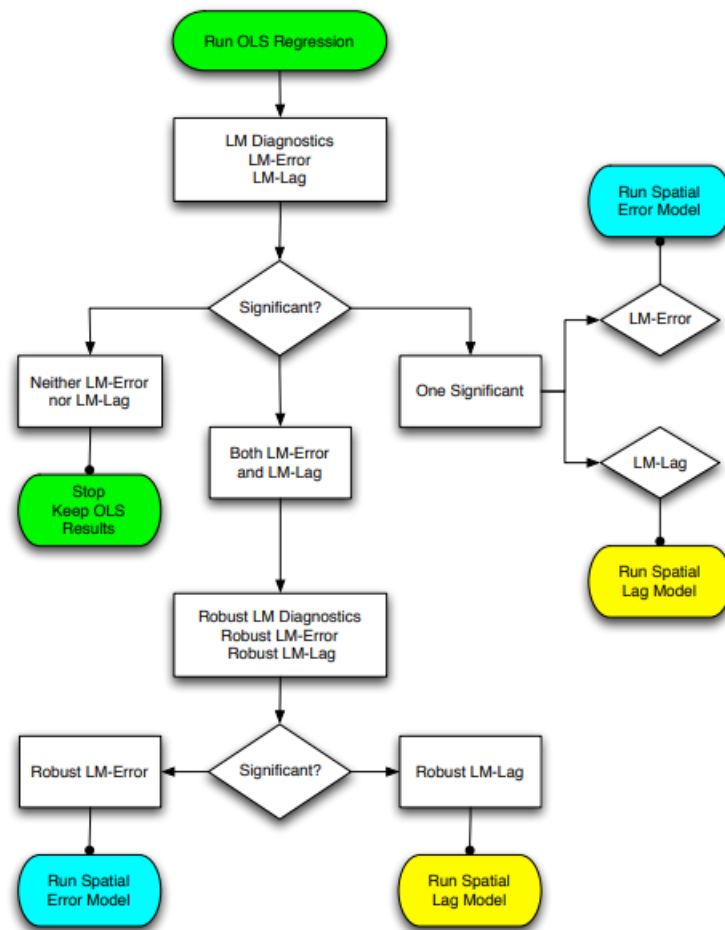
### 2.1.8. Diagnóstico para la especificación del modelo

Para seleccionar el modelo de regresión espacial más adecuado Anselin (2005) propone estimar primero un modelo de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) y en seguida explorar la necesidad de ampliarlo a un modelo de regresión espacial mediante la prueba del multiplicador de Lagrange (LM).

Esta prueba explora la autocorrelación espacial y si reside en la variable o en los residuos. La prueba arroja cinco diagnósticos, en los primeros dos (LM-Lag y la versión robusta, Robust LM-Lag) se prueba  $H_0$ : el modelo de MCO es ideal contra  $H_a$ : el modelo de rezago espacial es el adecuado. En los siguientes dos diagnósticos se (LM-Error y Robust LM-Error) se prueba la pertinencia de un modelo de error espacial donde  $H_a$  postula que el modelo de error espacial es el apropiado. El quinto diagnóstico LM-SARMA prueba si modelos de mayor orden con ambos tipos de rezagos son convenientes (Anselin, 2005).

Luego de realizar el LM test la estrategia de selección de modelo es esquematizada por Anselin (2005) de la figura 2.2. En el caso de que ambos modelos pasen la prueba de significancia en el diagnostico robusto se considera conveniente el modelo con el menor  $p - valor$ . Cuando

Figura 2.1: Proceso de selección del modelo espacial



Fuente: tomado de Anselin (2005), Exploring Spatial Data with GeoDa : A Workbook.

ambos modelos no pasan las pruebas de significancia deben examinarse posibles fallas en la especificación del modelo.

Los adelantos más recientes en econometría espacial sostienen que el modelo espacial de Durbin (SDM) supera a los modelos SAR y SEM. (LeSage and Pace, 2009) muestran que el modelo SDM subsume a los modelos SAR y SEM, afirman que cuando se modelan relaciones espaciales la influencia de variables omitidas pueden sesgar los resultados de los modelos de regresión espacial, además, las variables omitidas conducen a procesos generadores de datos que incluyen rezagos espaciales en las variables explicativas.

Elhorst (2010) establece dos razones por las cuales el SDM sobrepasa a otros modelos espaciales:

- el SDM es la única forma de producir coeficientes insesgados a pesar de que el verdadero proceso generador de datos obedezca a un rezago espacial endógeno (SAR), un error espacial (SEM) o al error espacial de Durbin (SDEM).
- constituye un modelo más robusto para la estimación de efectos de difusión, pues a partir del análisis de efectos directos e indirectos puede identificar *spillovers* locales y globales sin imponer restricciones a la magnitud de esos efectos.

De esta manera, la literatura más novedosa en econometría espacial sugiere la utilización del SDM sobre el resto de los modelos, ya que si el SDM no puede descartarse, será el modelo más apropiado para considerar la dependencia espacial.

## 2.2. Datos y selección de variables

El análisis se centra en los 2,456 municipios de México para el año 2013. Los municipios son divisiones político administrativas del territorio nacional que componen a los estados del país y que a su vez están conformados por localidades. Los datos sobre la generación de contaminantes liberados a la atmósfera provienen del Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes Criterio (INEM) integrado por la SEMARNAT. Los contaminantes referidos son: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>) y partículas con diámetro aerodinámico menor a 10 y 2.5 micrómetros (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>), compuestos orgánicos volátiles (COV) y amonio (NH<sub>3</sub>), emitidos por fuentes naturales y antropogénicas, estas últimas se clasifican como:

- **Fuentes fijas:** son instalaciones fijas orientadas a la producción manufacturera.
- **Fuentes de área:** son fuentes numerosas y dispersas que representan actividades comerciales, de servicios y residenciales.
- **Fuentes móviles:** se refiere a los vehículos de combustión interna que circulan en calles y carreteras.

La variable de interés (dependiente) en este estudio son las emisiones de  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$  y  $CO$  las cuales se analizan de forma agregada e individualmente. Respecto a las variables explicativas, se trata de explicar la variación de dichas emisiones contaminantes a partir de variables socioeconómicas que son características de la aglomeración urbana.

Dado que el fenómeno de aglomeración da lugar a procesos de urbanización polifacéticos, se deben considerar las diferentes dimensiones demográfica, social, económica y espacial que inciden en la generación de contaminantes. Las variables empleadas para la formulación del modelo econométrico aparecen en el cuadro 2.1 y el cuadro 2.2 presenta la estadística descriptiva de las variables implementadas, durante la limpieza de la base de datos se eliminaron 147 observaciones debido a valores faltantes, permaneciendo 2309 municipios.

Los datos de las variables se colectaron en diversas fuentes:

1. SEMARNAT. Inventario Nacional de Emisiones de México (INEM).

2. INEGI. Censo de Población y Vivienda, 2010: Principales resultados por localidad (ITER).
3. INEGI. Censos y conteos de Población y Vivienda, 2010: tabulados basicos.
4. INEGI. Censos Economicos, 2014.
5. UNAM: centro de estudios de desarrollo regional y urbano sustentable.
6. INEGI. Vehículos de motor registrados en circulación.

Cuadro 2.1: Selección de variables

Tipo de urbanización	Variable	Acrónimo	Fuente
Contaminación	Emisiones atmosféricas	<i>emis</i>	1
Demográfica	Grado de urbanización	<i>gu</i>	2
	Población total	<i>pobtot</i>	
Económica	Pob. ocupada en actividades secundarias	<i>pob_sec</i>	3
	Pob. ocupada en el comercio	<i>pob_com</i>	3
	Consumo de bienes y servicios	<i>consum</i>	4
	Proporción del PBT manufacturero	<i>pbt_manuf</i>	4
	Número de unidades económicas	<i>ue</i>	4
	índice de concentración espacial	<i>eg_indx</i>	2
Espacial	Densidad de la población	<i>dens</i>	5
Social	Automóviles en Privados	<i>motor</i>	6

La contaminación del aire que perjudica la salud humana se presenta como una mezcla de sustancias contaminantes que permanecen suspendidas en la atmósfera, afín de reflejar esa situación la variable de interés se construye como una medida agregada y representativa de la contaminación por emisiones liberadas a la atmósfera, tomando en cuenta los contaminantes criterio  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $CO$ , de modo que, cuando en este trabajo se hable de contaminación se estará haciendo referencia a esta medida. La variable *emis* se agregó de la siguiente manera:

$$emis = PM_{10} + PM_{2.5} + CO \quad (2.16)$$

Estos contaminantes son considerados primero porque provienen de actividades antropogénicas y, segundo, debido a que son utilizados alrededor del mundo para evaluar la calidad del aire en las ciudades. Respecto al **material particulado** puede decirse que son un conjunto

de diversas sustancias químicas que se encuentran suspendidos en la atmósfera por largos periodos. Las actividades productivas se encuentran dentro de sus principales fuentes de emisión, por lo tanto, se han identificado grandes concentraciones de estas partículas en el aire de las ciudades. La presencia de estas partículas en el aire reduce su calidad e impacta en la economía a través de la salud de la fuerza laboral. En cuanto al **monóxido de carbono**, este emana primordialmente de procesos industriales y actividades de transporte, y se ha identificado como el principal contaminante atmosférico en términos de volumen, por lo tanto su reducción constituye todo un desafío en términos de política pública.

## Variables explicativas

En la dimensión demográfica se considera a la *población total* de cada municipio puesto que se ha identificado como una medida del éxito relativo de los territorios para atraer o retener población. La urbanización es un proceso de ajuste del sistema de producción impulsado por fuerzas económicas que trasciende a la esfera demográfica, un indicador ampliamente utilizado para medir esa situación es el grado de urbanización, el cual refleja el peso de la población urbana respecto a la población total, se define como:

$$gu = \frac{pob. urbana}{pob. total} \times 100 \quad (2.17)$$

En la dimensión económica se considera a la *población total ocupada en el sector secundario*, y el *producto bruto total de las manufacturas* como medidas de la presión que ejercen las actividades secundarias en las emisiones, bajo la idea de que estas actividades tienden a aglomerarse en el espacio, consecuentemente se incluye un índice de concentración geográfica propuesto por Ellison and Glaeser (1997). Por otro lado, se toma en cuenta la población ocupada en el comercio para capturar su aportación a la contaminación. También, se considera el número de *unidades económicas* como un reflejo de las economías de aglomeración para las empresas formales de cualquier tipo, siguiendo la idea de que un mayor número de firmas se corresponde con mejores ventajas productivas. Se incorpora las ventas de bienes y servicios finales de las empresas como una medida de las actividades de *consumo*.

En cuanto a la urbanización espacial se emplea la densidad poblacional como una medida de la intensidad con la que se ocupa el territorio.

$$dens = \frac{pob. total}{superficie (km)^2} \quad (2.18)$$

Finalmente, se considera que la urbanización exige formas de motorización adecuadas para hacer frente a los desplazamientos intra e interurbanos donde predominan los vehículos de combustión interna, por lo tanto se contempla un índice de motorización elaborado con el número de vehículos registrados y en circulación, el cual se define como:

$$motor = \frac{\text{número de vehículos}}{1000} \quad (2.19)$$

Respecto a la aglomeración, es ampliamente reconocido en la geografía económica y la economía regional que la actividad económica tiende concentrarse espacialmente como consecuencia de las economías de aglomeración y que su concentración excesiva da lugar a problemas medioambientales, sin embargo, no existe consenso en cuanto a los métodos e índices que se han utilizado para medir ese fenómeno, de tal modo que se reconocen tres generaciones de índices (Kominers, 2008).

Los primeros índices de aglomeración como el de GINI y Herfindal se asumen como espaciales en la medida que utilizan como insumo datos de unidades espaciales. A partir de la NGE surge una segunda generación de indicadores, conducida por el índice de Ellison- Glaeser que se caracterizan por asumir el espacio de manera discreta. La tercera generación de índices se desarrolló para dar respuesta a dichas carencias y por lo tanto, trabaja con modelos espaciales continuos tal es el caso del índice propuesto por Durantón y Overman (2005) el cual computa la distribución geográfica entre firmas (Kominers, 2008).

A pesar de que el índice de Ellison y Glaeser pertenece a la segunda generación de índices, es una de los más aceptados y de uso extendido en los estudios de aglomeración, debido a que es una medida efectiva del grado de concentración, además de que es de fácil manejo y requiere datos asequibles. Cuando en este trabajo se utiliza la aglomeración como una variable explicativa en los modelos econométricos se emplea el índice de concentración geográfica de Ellison- Glaeser, el propósito es obtener una medida de aglomeración a partir del empleo en el sector secundario para cada municipio del país.

$$eg\_indx = \frac{(\text{empleo secundario en municipio } i - \text{empleo total en el estado})^2}{1 - \sum_{i=1}^n (\text{empleo total municipal})^2} \quad (2.20)$$

En el numerador se tiene la proporción del empleo secundario en el municipio  $i$  respecto a su estado menos la proporción del empleo total del estado respecto al total nacional, el resultado de la sustracción se eleva al cuadrado. En el denominador, a la unidad se le resta la proporción del empleo municipal al cuadrado.

Cuadro 2.2: Estadística descriptiva de las variables

Variable	Media	Desv. Std	Min.	Max.	Medida
emis	3982.48	8616.605	16.08	118012.28	Ton.
gu	40.69	35.861	0	100	%
pobtot	47813	136619.3	131	1815786	Unidades
pob_sec	4846	16827.61	0	290307	Unidades
pob_com	3548	12648.33	0	192673	Unidades
consum	7444.5	38318.19	0.2	698567.2	Miles de \$
pbt_manuf	29.75	25.188	0	99.22	Miles de \$
dens	280.31	1194.74	0.144	17552.79	Personas/km <sup>2</sup>
motor	15.63	57.5616	0.004	822.065	Miles
ue	1800	5769.2	4	90533	Unidades

Finalmente, en el cuadro 2.2 se presentan algunas medidas de estadística descriptiva. Vemos que un municipio típico en México genera en promedio 3982 toneladas de emisiones al año. La alta desviación estándar sugiere que los datos se encuentran dispersos en un amplio rango de valores.

Un municipio promedio en el país cuenta con una población de 47,813 habitantes, un grado de urbanización de 47.83 %, casi 5 mil personas ocupadas en el sector secundario, 280 personas por kilómetro cuadrado, casi 16 vehículos por cada mil habitantes y contiene 1800 empresas establecidas. Además, los datos de cada una de las variables se caracterizan por una gran dispersión respecto a la media.

## 2.2.1. Distribución espacial de los datos

### Visualización por cuantiles

Para tener una primera aproximación de como se encuentran espacialmente distribuidos los datos, se muestran mapas cloropléticos tanto de la variable de interés *emis* y las variables consideradas como explicativas. La gama de colores obedece a cortes en los datos por cuantiles. Los colores oscuros indican valores mas altos, lo opuesto indican los colores claros. En la figura 2.2, los datos se han segmentado por deciles, esto permite apreciar que no hay homogeneidad en la distribución espacial de las emisiones contaminantes, por el contrario en ciertas zonas del país se observan niveles superiores y en otras zonas niveles inferiores.

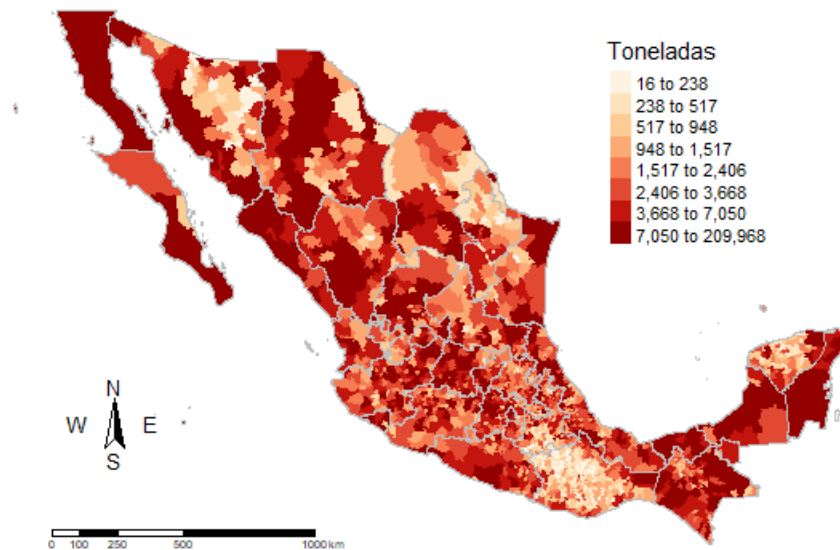


Figura 2.2: Mapa de la variable *emis*.

Fuente: elaboración propia con base en datos de INEGI.

Se advierte una zona sombreada en tonos mas oscuros en la parte central del país, que comprende la ciudad de México, el Estado de México, Querétaro, Guanajuato, la parte noreste de Jalisco. En general en la línea costera del golfo de Baja California desde Sinaloa hasta Tijuana se localizan municipios que están dentro de los últimos deciles. Al noreste del país, municipios al sur de Coahuila y de Nuevo León mantienen altos niveles de emisiones. En el golfo de México, se concentran en Tabasco, Campeche y Quintana Roo.

En contraste, hacia el norte del país, se advierten grupos de municipios con bajos niveles de emisiones en gran parte del estado de Sonora, en la parte norte de Coahuila y Nuevo León. Hacia el sur del país resalta el agrupamiento de numerosos municipios del estado de Oaxaca en tonalidades más claras dentro de la gama de colores, también se aprecia un agrupamiento similar dentro de Yucatán.

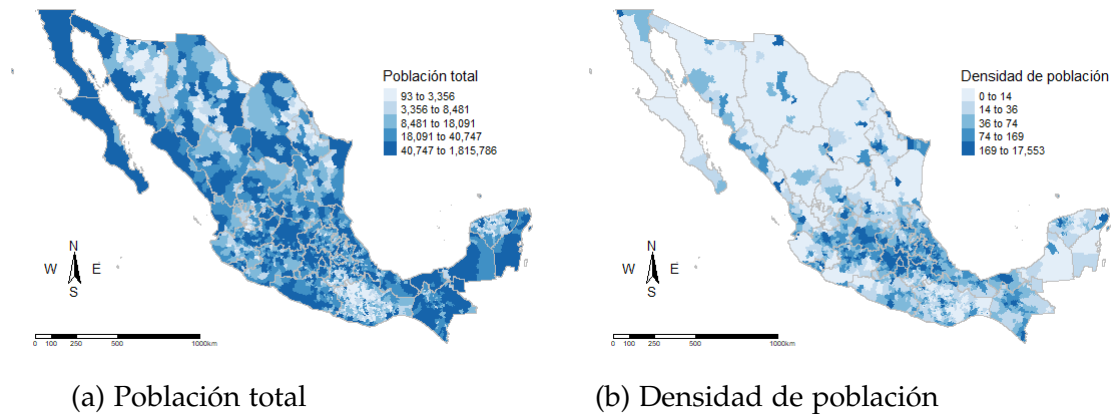


Figura 2.3: Distribución espacial de la población

Fuente: elaboración propia con base en datos de INEGI.

Aunque cada entidad federativa suele tener uno o varios grandes centros poblacionales en la figura 2.3(a) se aprecia que el centro y centro norte concentran la mayoría de los municipios más poblados del país, esta zona incluye gran parte de Jalisco, Guanajuato, Estado de México, Ciudad de México y Puebla. El mapa sugiere que la población no se distribuye de manera aleatoria aunque la dependencia espacial parece moderada. La figura 2.3(b) muestra que la densidad poblacional es alta en el centro del país y extremadamente baja hacia el norte y el sur. El mapa también sugiere una fuerte autocorrelación espacial en esta variable.

En la figura 2.4(a) se advierte una zona altamente urbanizada en torno a la ciudad de México, abarcando numerosos municipios del estado de México, Morelos, Puebla, Tlaxcala que cuentan con niveles de urbanización por encima del 55%. En el bajío entre los estados de Jalisco y Michoacán se agrupan múltiples municipios que se encuentran en una fase avanzada de proceso de urbanización. En términos generales los estados fronterizos del norte y la península de Baja California presentan altos niveles de urbanización. En cambio, municipios con niveles de urbanización por debajo del 55% se agrupan al sur de Chihuahua, Durango,

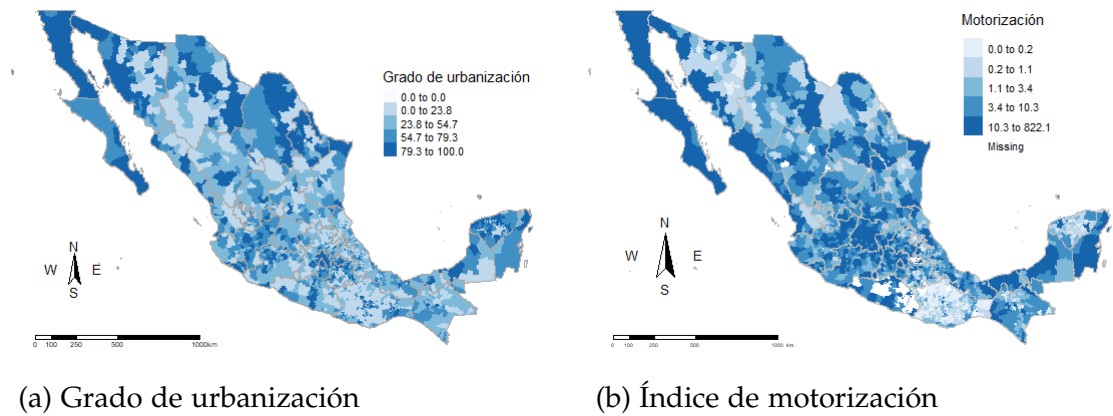


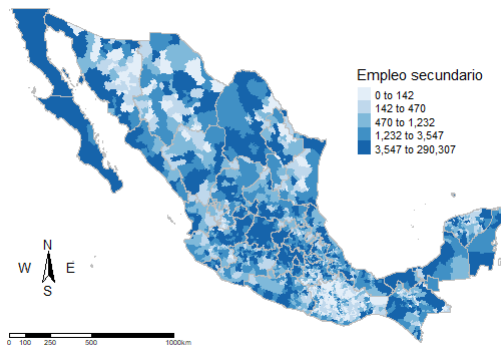
Figura 2.4: Distribución espacial de la urbanización y el automóvil

Zacatecas. En general, al sur del país predominan municipios rurales y con bajos niveles de urbanización. Por otro lado, la figura 2.4(b) muestra que la densidad de los automóviles en circulación es mas alta el centro del país, desde Jalisco hacia la ciudad de México, pasando por Guanajuato y Querétaro donde se ha configurado un corredor industrial de producción de automóviles.

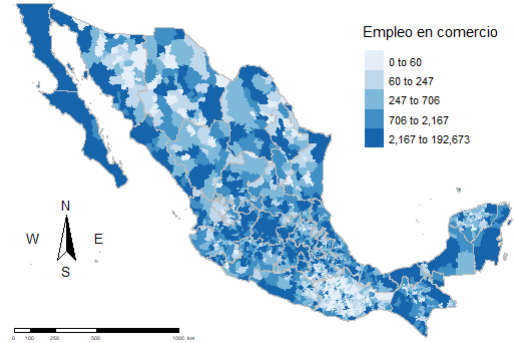
En la figura 2.5(a) y 2.5(b) se nota que los empleos en actividades secundarias y el comercio son similares, se concentran principalmente en el centro y el bajío; al norte, en Baja California, Coahuila y varios municipios de Nuevo León. Por otro lado se aprecia un agrupamiento de municipios coloreados en tonos claros en Sonora, sur de Chihuahua y norte de Durango, asimismo gran parte de Oaxaca y Yucatán aparece en tonalidades claras.

La figura 2.6(a) muestra el agrupamiento de municipios con bajos niveles de consumo en los estados de Guerrero y Oaxaca. En cambio, hay altos niveles de consumo en Baja California norte y sur, Coahuila y Nuevo León, además, se observa un agrupamiento importante desde el noreste de Jalisco , el bajío y la zona de la Ciudad de México. Al sur, municipios cercanos a la zona petrolera de Tabasco presentan al niveles de consumo.

En la figura 2.6(b) se advierte que el PBT manufacturero esta más localizado que el empleo secundario. Una agrupación de municipios con alto PBT se distingue en Nuevo León, Coahuila y Chihuahua. Otro agrupamiento se aprecia desde el este de Jalisco y se extiende hacia Guanajuato, Querétaro, Estado de México, Ciudad de México, Puebla y Tlaxcala. En cambio,



(a) Empleo en sector secundario

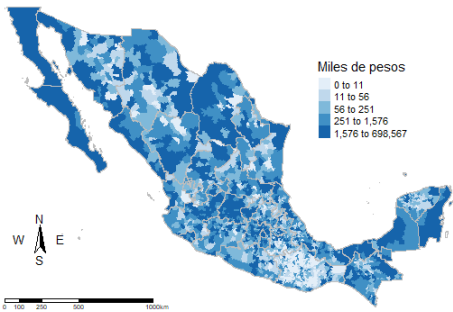


(b) Empleo en el comercio

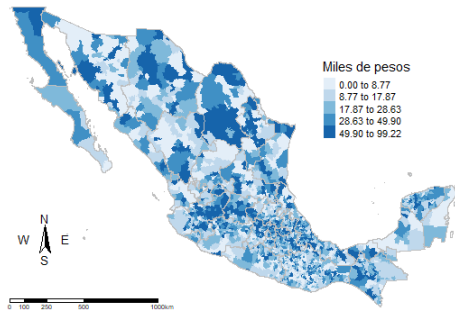
Figura 2.5: Distribución espacial del empleo

Fuente: elaboración propia con base en datos de INEGI.

desde sur de Chihuahua hasta Zacatecas los municipios presentan bajos niveles de PBT, lo mismo puede decirse del pacífico sur y la península de Yucatán.



(a) consumo de bienes y servicios



(b) Producto bruto manufacturero.

Figura 2.6: Distribución espacial del consumo y la producción manufacturera

Fuente: elaboración propia con base en datos de INEGI.

## Conclusiones del capítulo

La econometría espacial provee algunos de los métodos más novedosos aplicados en el análisis urbano y regional, en temas como las economías de aglomeración. La capacidad de manejar datos georeferenciados y la posibilidad de medir *spillovers* entre regiones vecinas ha motivado su creciente utilización. Las posibilidades de aplicación de estas técnicas trascienden hacia otros campos analíticos, lo que ha impulsado la adopción de estos métodos a la hora de abordar temas referidos al medio ambiente como es el caso de esta tesis.

Dado lo anterior, en este capítulo se presentaron diversas herramientas para identificar propiedades espaciales en los datos como la autocorrelación espacial. En ese respecto se indicó que el *I de Moran* es una de las pruebas estadísticas más robustas para identificar la dependencia espacial global, luego se detalló que los *LISA* basados en el *I de Moran* y el estadístico *G de Getis* son técnicas complementarias para el análisis exploratorio, las cuales permiten la identificación de *clusters* espaciales.

Adicionalmente, se presentó la forma funcional y el proceso generador de datos de los modelos SAR, SEM SAC, SLX y SDM. Además, se describió como las matrices de ponderadores espaciales permiten la modelación de los rezagos espaciales y se argumentó que ante la presencia de dependencia espacial, la incorporación de términos autorregresivos mejora la precisión de los coeficientes de regresión. Se delineó la estrategia a seguir para determinar la forma más adecuada de modelar la dependencia espacial, siguiendo la propuesta de Anselin (1988) de estimar MCO y realizar las pruebas del *multiplicador de Lagrange (LM)* para descartar los modelos no significativos .

Se cuenta con datos a nivel municipal provenientes de SEMARNAT e INEGI, con los cuales se construyó la base de datos que permitió la realización del posterior análisis exploratorio y la estimación de los modelos. En este apartado se justificó la adopción de las variables y se les asignó un acrónimo.

Por otra parte, un primer análisis visual sobre la distribución espacial de las emisiones fue posible gracias a los mapas temáticos, donde los datos se segmentaron por cuantiles. Los mapas sugieren que las emisiones se encuentran más concentradas de lo que se esperaría de

un proceso aleatorio, pero se requiere de la aplicación de pruebas estadísticas que determinen la presencia de autocorrelación espacial en los datos.

## CAPÍTULO 3

### ANÁLISIS DE ECONOMETRÍA ESPACIAL

La contaminación del aire está ligada a los procesos económicos que ocurren en las ciudades y cuyos efectos negativos perjudican a sus habitantes al ver reducida su calidad de vida, además se considera que las ciudades juegan un rol clave en el agravamiento o atenuación de la contaminación atmosférica. El diseño e implementación de políticas públicas eficientes encaminadas a reducir las emisiones contaminantes requiere identificar de manera científica donde se concentra la contaminación e identificar aquellos factores que propician mayores niveles de emisiones contaminantes.

Al examinar la contaminación del aire en las ciudades puede ser que la influencia del espacio sea tan relevante que omitirla conduzca a errores de estimación. Si la influencia del espacio es tan relevante que no puede ser ignorada, los datos debiesen exhibir la presencia de autocorrelación espacial, entonces aplicar modelos de regresión espacial es lo más apropiado.

En ese sentido, en presente capítulo se construyen matrices de ponderadores espaciales y se presentan los mapas de conexiones correspondientes. Luego, se aplican pruebas estadísticas como *I de Moran* para determinar la presencia de dependencia espacial global. Además, se emplean los *LISA* y los estadísticos *G de Getis*, para la identificación de *clusters* o **hotspots** a fin de identificar las conglomeraciones de contaminantes.

Con la finalidad de identificar la incidencia de factores socioeconómicos asociados a la aglomeración sobre las emisiones contaminantes se estiman los modelos de regresión espacial. Siguiendo la propuesta de Anselin (1988) y considerando evidencia estadística como el criterio de información de Akaike y el loglikelihood se determina la mejor forma de modelar la dependencia espacial. Finalmente, se interpretan los resultados de las estimaciones.

## 3.1. Análisis espacial exploratorio

### 3.1.1. Dependencia espacial global

Para realizar el análisis espacial con pruebas estadísticas se requiere definir una matriz de ponderadores espaciales que represente la relaciones de vecindad entre los municipios o localizaciones. Debe tenerse en cuenta que la proximidad geográfica es central cuando se trata de identificar dependencia espacial, en ese sentido, se construye una matriz de ponderadores espaciales de tipo *esfera de influencia*, donde el área de influencia adopta una forma circular cuyo centro es, además, el centroide del polígono. Dos puntos se conectan si el área de influencia de una localización se superpone con el área de influencia de sus vecinos más cercanos. Bajo ese criterio se establecen las relaciones de vecindad y se genera el mapa de conexiones entre los municipios de México como se muestra en la figura 3.1.

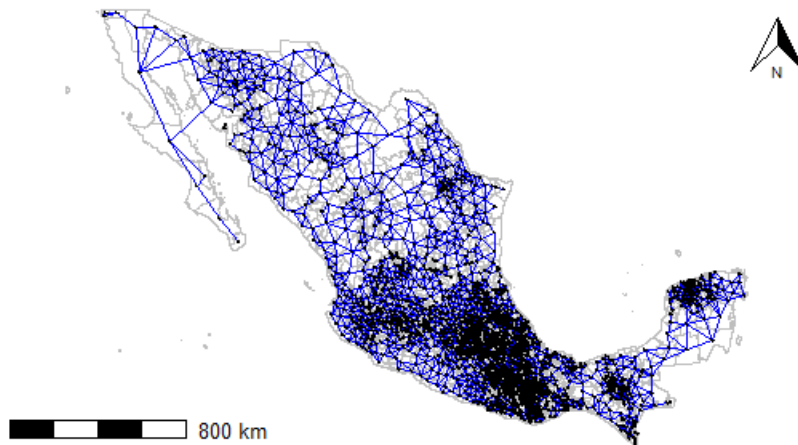


Figura 3.1: Mapas de conexiones entre municipios de México (W de esferas de influencia).

Fuente: elaboración propia con base en datos de INEGI.

La dependencia espacial se refiere a que los valores de cierta variable en cierto municipio están condicionados por los valores que adopta esa variable en municipios vecinos, identificar la dependencia espacial en la variable dependiente es crucial porque especificar un modelo sin un proceso espacial autorregresivo cuando hay dependencia espacial en los datos puede conducir a estimaciones sesgadas. Con es propósito se aplica la prueba *I de Moran* para identificar la dependencia espacial global, el índice es un valor único para todo país.

El cuadro 3.1 muestra el coeficiente de autocorrelación y p- valor para contrastar la significancia estadística. En primera instancia, la variable endógena *emis* exhibe dependencia espacial positiva y significativa. En consecuencia los modelos de regresión espacial como el SAR deben generar coeficientes más precisos en comparación con los de MCO. Además, los respectivos *I de Moran* de las sustancias que componen la variable *emis* como el monóxido de carbono, el  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  presentan un *I de Moran* positivo que supera la prueba de significancia. La evidencia sugiere que estas emisiones se encuentran más concentradas en el espacio de lo que se esperaría si distribuyeran aleatoriamente y según la magnitud del *I de Moran* las emisiones de *CO* se encuentra más conglomeradas.

Cuadro 3.1: *I de Moran* global de la variable *emis*.

Variable	W de esferas de influencia		
	I de Moran	Z valor	P valor
emis	0.2394	17.229	0.0000
PM10	0.1606	11.566	0.0000
PM25	0.1439	10.369	0.0000
CO	0.2449	17.63	0.0000

Fuente: elaboración propia con base en datos de INEGI.

En el cuadro 3.2 aparecen los resultados del *I de Moran* para las variables explicativas, de manera general, se advierten coeficientes de autocorrelación espacial positivos y p - valores muy bajos, lo cual sugiere que la dependencia espacial es significativa. Esto apunta a que, globalmente, valores altos o valores bajos de estas variables tienden a concentrarse en el espacio, esta propiedad es más fuerte en la densidad poblacional, el grado de urbanización y la densidad vehicular.

Cuadro 3.2: I de Moran global para las variables explicativas

Variable	W de esferas de influencia		
	I de Moran	Z valor	P valor
gu	0.4666	33.554	0.0000
pobtot	0.3127	22.497	0.0000
pobsec	0.2296	16.526	0.0000
pobcom	0.3259	23.446	0.0000
consum	0.2917	20.991	0.0000
pbtmanuf	0.2470	17.779	0.0000
dens	0.7948	57.137	0.0000
motor	0.3537	25.443	0.0000
ue	0.2963	21.32	0.0000
eg_indx	0.0514	3.7258	0.0002

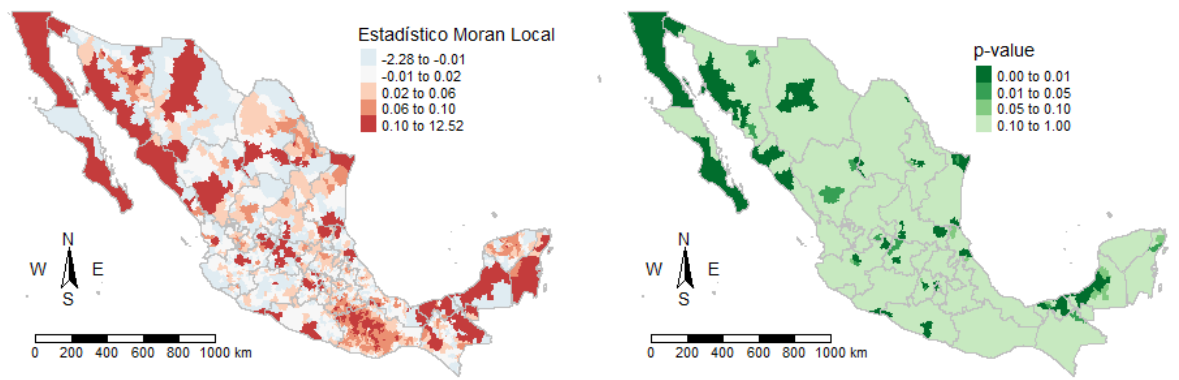
Fuente: elaboración propia con base en datos de INEGI.

El *I de Moran global* permite afirmar que nivel nacional los municipios con altos niveles de contaminación se encuentran rodeados de municipios con niveles similares, asimismo, municipios con bajos niveles de contaminación tienen vecinos con bajos niveles de contaminación, de manera que se forman conglomeraciones de municipios con emisiones semejantes.

### 3.1.2. Dependencia espacial local

Los indicadores de asociación espacial local (LISA) basados en *I de Moran local* permiten evaluar la autocorrelación espacial de cada municipio, de modo que aporta información sobre el grado de similitud o diferencia entre el volumen de las emisiones de un municipio en relación con las emisiones de los municipios vecinos. Además, estadístico G de Getis mide la concentración de altos o bajos niveles de emisiones respectivas a los municipios, denominados puntos calientes y fríos. En esta sección se aplican estas técnicas con el propósito de reconocer las conglomeraciones de las emisiones.

Al estandarizar el I de Moran local y visualizarlo en un mapa temático resulta la figura 3.2(a), este muestra donde se concentran tanto valores positivos como valores negativos. Los tonos oscuros indican los municipios que tienen vecinos con características similares, en este



(a) I de Moran local estandarizado.

(b) P valores del I de Moran local.

Figura 3.2: Mapas del I de Moran local de las emisiones contaminantes.

Fuente: elaboración propia con base en datos de INEGI.

caso el nivel de emisiones contenido en la variable *emis*, en cambio, los tonos azules muestran los municipios con vecinos con emisiones disimiles.

Con la intención de observar cuales asociaciones son estadísticamente significativas se realiza un mapa de *p-valores*. La figura 3.2(b) muestra en tonos claros los municipios donde el I de moran local no es significativo y por lo tanto las emisiones son especialmente aleatorias, mientras que los tonos oscuros los municipios donde los *p-valores* son lo suficientemente bajos para establecer la dependencia espacial local. Esto sugiere posibles conglomeraciones pero, no permite distinguir si corresponden a municipios con bajos o altos niveles de emisiones.

La figura 3.3 muestra mapas de identificación de clusters elaborados a partir del *I de Moran local*, los cuales permiten la identificación de puntos calientes, puntos fríos y *outliers espaciales* (Brunsdon and Comber, 2015). Ambos mapas identifican la concentración de municipios con altos niveles de emisiones conocidos como puntos calientes, resulta interesante que estos se corresponden geográficamente con las principales aglomeraciones urbanas del país como la Ciudad de México, Monterrey, Guadalajara, Tijuana, Toluca, Torreon, León, Saltillo entre otras. Por otro lado, no se aprecian puntos fríos ni *outliers* espaciales. De manera que, en los municipios que permanecen en blanco la autocorrelación espacial local es no significativa.

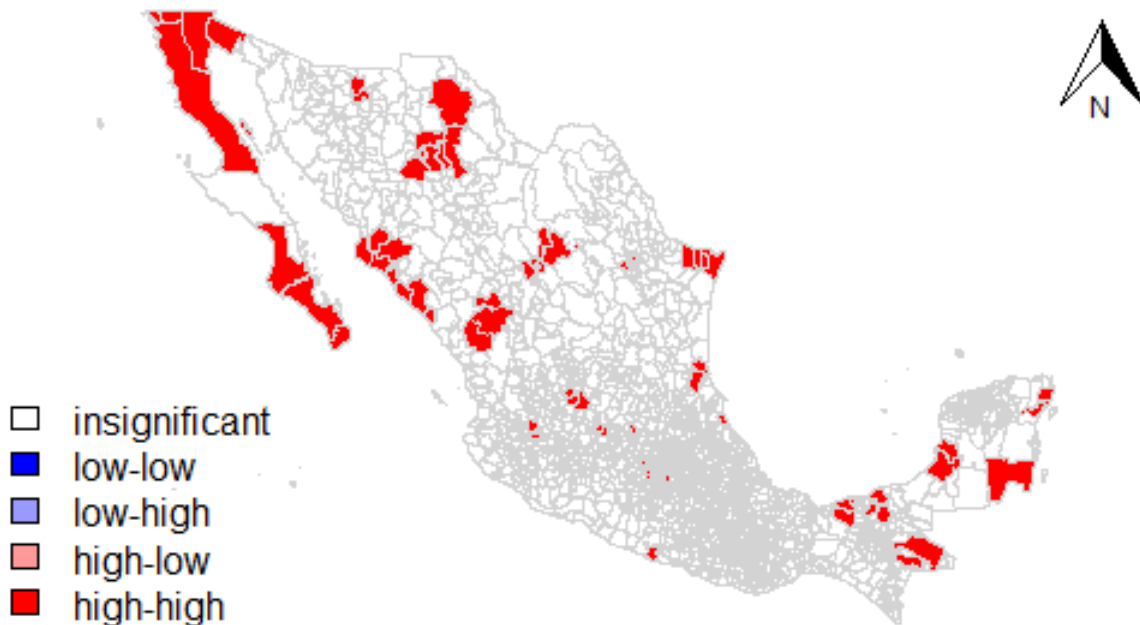


Figura 3.3: Análisis LISA para las emisiones a nivel nacional.

Fuente: elaboración propia con base en datos de INEGI.

Por otro lado, el estadístico *G de Getis* es una propuesta que puede catalogarse como alternativa y al mismo tiempo complementaria al análisis *LISA* para evaluar la autocorrelación espacial. Al igual que los *LISA* permite la identificación de puntos calientes y fríos (Brunsdon and Comber, 2015).

Los estadísticos  $G_i$  son valores  $Z$  estandarizados, de modo que valores  $Z$  altos representan una mayor intensidad de agrupamiento de municipios y el signo positivo indica que son agrupamientos con elevados niveles de contaminación. Lo opuesto si se tienen valores  $Z$  altos con signo negativo.

La figura 3.4 se identifican los puntos calientes y fríos de contaminación por emisiones, los puntos calientes se hayan sombreados en rojo y los puntos fríos en tonos claros. Los mapas revelan que las emisiones asociadas a los municipios se hayan más concentradas de lo que se esperaría de un proceso aleatorio. Además, el *G de Getis* no solo identifica los mismos conglomerados que los *LISA*, sino que reconoce un mayor número de agrupamientos, además de aquellos lugares que se corresponden geográficamente con las principales ciudades del

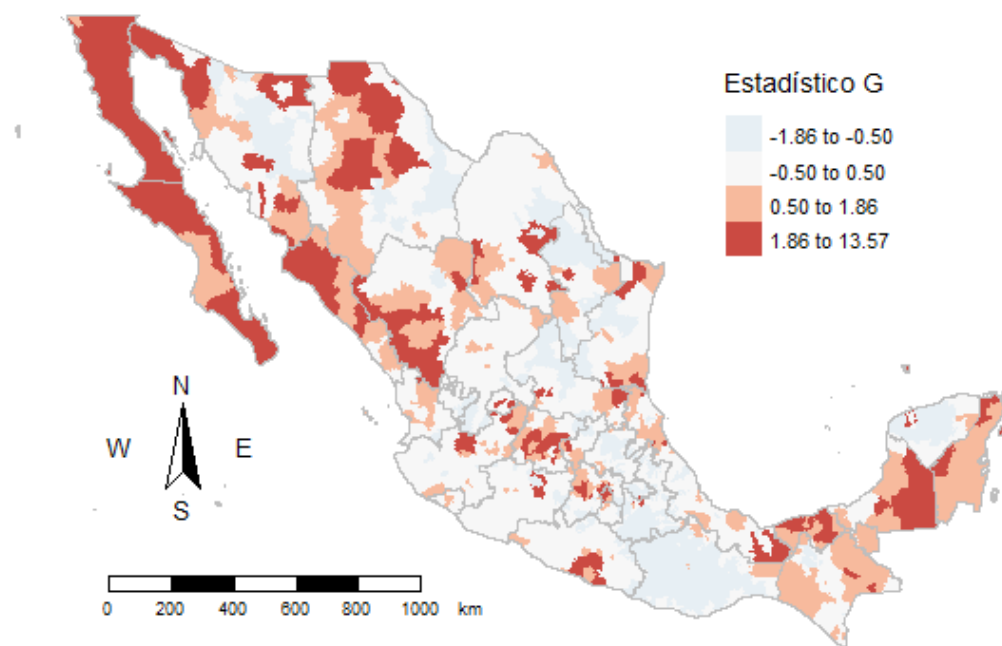


Figura 3.4: Identificación de puntos calientes y fríos mediante el estadístico G de Getis.

Fuente: elaboración propia con base en datos de INEGI.

país, resaltan como puntos calientes varios municipios de Durango, Sonora y Chihuahua que localizan en zonas con actividad minera, y también, la zona petrolera de Tabasco.

Al norte de Coahuila y Nuevo León se encuentran municipios con bajos volúmenes de emisiones cuyos vecinos también generan pocas emisiones. De igual manera, numerosos municipios con bajas emisiones se agrupan en los estados de Hidalgo, Puebla, Tlaxcala y Oaxaca. Por otro lado, en la zona del pacífico dentro de los Estados de Jalisco, Michoacán y Guerrero se tiene valores Z cercanos a cero, por lo que no hay evidencia de concentración.

### 3.2. Resultados de los modelos de regresión espacial

De acuerdo con Anselin (2005) y LeSage (2008) una metodología apropiada es iniciar el análisis econométrico a partir de un modelo lineal de mínimos cuadrados ordinarios para luego relajar el supuesto de independencia entre las observaciones y con ello estimar modelos de regresión espaciales que consideran la autocorrelación espacial.

En este trabajo el modelo busca explicar la incidencia de factores socioeconómicos relacionados con la aglomeración urbana sobre los niveles de contaminación representados por la variable dependiente *emis*. En ese sentido, se propone iniciar con una regresión lineal múltiple con la siguiente forma funcional y cuyos resultados aparecen en el cuadro 3.3:

$$y = X\beta + \epsilon \quad (3.1)$$

donde  $y$  es un vector que contiene las observaciones de la variable *emis*,  $X$  es una matriz de  $n \times k$  que contiene las variables explicativas: *pobtot*, *gu*, *motor*, *pob\_sec*, *pob\_com*, *consum*, *pbt\_manuf* y *eg\_indx*.

Cuadro 3.3: Parámetros estimados de MCO

Modelo 1		Modelo 2	
constante	153.9	constante	1166***
pobtot	0.137***	dens	-1.427***
gu	6.919**	gu	17.27***
motor	22.87***	motor	87.49***
consum	0.021***	consum	0.03***
pbt_manuf	15.24**	pbt_manuf	15.78***
pob_sec	-0.105***	ue	0.239**
pob_com	-0.125***	eg_indx	19120*
ue	0.508***		
eg_indx	51160***		
$R^2$	0.6736	$R^2$	0.6162
Adj. $R^2$	0.6723	Adj. $R^2$	0.6151
Num.Obs.	2309	Num.Obs.	2309

\*\*\* $p < 0.01$ ; \*\* $p < 0.05$ ; \* $p < 0.1$

Cuando se trabaja con datos empíricos es frecuente que exista alguna correlación entre las variables utilizadas, lo cual puede conducir al problema de multicolinealidad. Este problema afecta principalmente la eficiencia de los estimadores al ocasionar varianzas y covarianzas grandes que perjudican la precisión de los coeficientes  $\beta$  asociados a las variables explicativas, llevando a valores de los coeficientes, inclusive signos y significancia estadística erróneos. Por lo tanto se empleó el *factor de inflación de varianza (VIF)* para identificar las variables que propician la multicolinealidad. La premisa aquí es que conforme la colinealidad aumenta la varianza del estimador crece. En ese respecto se sabe que un VIF  $>10$  indica un alto grado de multicolinealidad, mientras que un VIF próximo a 1 apunta a que no se tiene este problema.

Cuadro 3.4: Diagnóstico de Multicolinealidad

Modelo 1 (MCO)			Modelo 2 (MCO)		
Variable	VIF	Diagnóstico	Variable	VIF	Diagnóstico
pobtot	72.63	1	dens	1.8	0
gu	1.25	0	gu	1.26	0
motor	13.74	1	motor	9.55	0
consum	2.5	0	consum	2.22	0
pbt_manuf	1.15	0	pbt_manuf	1.11	0
pob_sec	10.04	1	ue	9.24	0
pob_com	51.99	1	eg_indx	1.34	0
ue	19.33	1			
eg_indx	1.23	0			
$R^2$ de $y$ en todas las $x = 0.6736$			$R^2$ de $y$ en todas las $x = 0.6162$		
1 colinealidad; 0 no colinealidad			1 colinealidad; 0 no colinealidad		

En respuesta a este problema se optó por eliminar las variables de *pobtot*, *Pob sec* y *pob\_com* que presentaban un  $VIF > 10$  de forma que se logró que el resto de variables presentaran un  $VIF < 10$  sin afectar el ajuste del modelo, así pues se solventó en buena medida la multicolinealidad y se añadió la variable *dens*, dejando el modelo con 7 variables explicativas, las estimaciones del segundo modelo por MCO aparecen en el cuadro 3.3.

Una vez estimados ambos modelos lineales por MCO se realiza una prueba Breusch-Pagan para identificar la presencia de heterocedasticidad. Los resultados en el cuadro 3.5 muestran *P- valores* inferiores por lo cual se rechaza la hipótesis nula de homocedasticidad y se concluye

que la varianza del error no es constante.

Cuadro 3.5: Detección de heterocedasticidad

studentized Breusch-Pagan test		
	Modelo 1 (MCO)	Modelo 2 (MCO)
BP	82.026	64.39
P-valor	0.0000	0.0000

En la sección previa se confirmó la autocorrelación espacial, esta condición puede estar detrás de la presencia de heterocedasticidad en los errores, aunque puede haber otros factores. Se aplica la prueba de *I de Moran* a los residuos de la regresión de MCO con el fin de ratificar que no hay dependencia espacial entre los errores. Los resultados de la prueba (cuadro 3.6) permiten rechazar la hipótesis nula en favor de la hipótesis alternativa de modo que se constata la dependencia espacial en los residuos.

Cuadro 3.6: I de Moran global para los residuos de regresión

Modelo: MCO		
	Estadístico	P-valor
I de moran	0.1215	0.0000

Dado que se ha identificado autocorrelación espacial en la variable dependiente y en los residuos de la regresión de MCO, se siguió la propuesta de Anselin (2005) para la especificación del modelo, la cual consiste en realizar las pruebas de del Multiplicador de Lagrange (LM). La prueba plantea como hipótesis nula que el mejor modelo es el de mínimos cuadrados y alternativamente que el modelo de rezago espacial (SAR) o el modelo del error espacial (SEM) son los adecuados.

Los resultados presentados en el cuadro 3.7 muestran que para el modelo SAR y SEM el  $p$  - *valor* es 0.0000 por lo tanto se desprende que ambos modelos son adecuados. Al revisar las versiones robustas de la prueba LM para el modelo SEM es significativo al 1 %, mientras que LM para el modelo SLM es significativo al 5 %, y dado que el modelo SEM tiene un menor  $p$  - *valor* parece ser el más adecuado. Además, la prueba LM arroja que un modelo con proceso autorregresivo y con errores espaciales autorregresivos (SAC) puede ser adecuado. Así pues, los tres modelos parecen pertinentes pero SEM y SAC destacan sobre el SAR.

Cuadro 3.7: Diagnóstico del multiplicador de Lagrange para la dependencia espacial

	Estadístico	P-valor
LMerr	122.3	0.0000
RLMerr	34.398	0.0000
LMlag	93.073	0.0000
RLMlag	5.1716	0.02296
SAC	127.47	0.0000

Para determinar la forma de la autocorrelación espacial se estimaron modelos de regresión espacial, los cuales toman en cuenta la localización de las unidades espaciales (municipios) dentro de la estimación al incorporar rezagos espaciales en las variables explicativas y contemplan procesos autorregresivos. Se estiman todos los modelos *SAR*, *SEM*, *SAC*, *SLX* y *SDM* por motivos de comparación.

La forma empírica que adoptan estos modelos son las siguientes:

#### Modelo SAR

$$emis = \rho Wemis + \beta_1 dens + \beta_2 gu + \beta_3 motor + \beta_4 consum + \beta_5 pbt\_manuf + \beta_6 ue + \beta_7 eg\_indx + \epsilon$$

donde  $\rho$  es el parámetro autorregresivo;  $W$  una matriz de ponderadores espaciales de tipo esfera de influencia;  $\epsilon$  el término de error.

#### Modelo SEM

$$emis = \beta_1 dens + \beta_2 gu + \beta_3 motor + \beta_4 consum + \beta_5 pbt\_manuf + \beta_6 ue + \beta_7 eg\_indx + u$$

$$u = \rho Wu + \epsilon$$

donde  $\lambda$  es el parámetro autorregresivo;  $W$  una matriz de ponderadores espaciales de tipo esfera de influencia;  $u$  el término de error.

## Modelo SAC

$$\begin{aligned}emis &= \rho Wemis + \beta_1 dens + \beta_2 gu + \beta_3 motor + \beta_4 consum \\ &+ \beta_5 pbt\_manuf + \beta_6 ue + \beta_7 eg\_indx + u \\ u &= \theta Wu + \varepsilon\end{aligned}$$

donde  $\rho$  y  $\lambda$  son parámetros autorregresivo;  $W$  una matriz de ponderadores espaciales de tipo esfera de influencia;  $u$  el término de error.

## Modelo SLX

$$\begin{aligned}emis &= \beta_1 dens + \beta_2 gu + \beta_3 motor + \beta_4 consum + \beta_5 pbt\_manuf + \beta_6 ue \\ &+ \beta_7 eg\_indx + \gamma_1 Wdens + \gamma_2 Wgu + \gamma_3 Wmotor + \gamma_4 Wconsum + \gamma_5 Wpbt\_manuf \\ &+ \gamma_6 Wue + \gamma_7 Weg\_indx + \varepsilon\end{aligned}$$

donde  $W$  es una matriz de ponderadores espaciales de tipo esfera de influencia;  $\varepsilon$  el término de error; no considera términos autorregresivos.

## Modelo SDM

$$\begin{aligned}emis &= \rho Wemis + \beta_1 dens + \beta_2 gu + \beta_3 motor + \beta_4 consum + \beta_5 pbt\_manuf + \beta_6 ue \\ &+ \beta_7 eg\_indx + \gamma_1 Wdens + \gamma_2 Wgu + \gamma_3 Wmotor + \gamma_4 Wconsum + \gamma_5 Wpbt\_manuf + \\ &\gamma_6 Wue + \gamma_7 Weg\_indx + \varepsilon\end{aligned}$$

donde  $\rho$  es el parámetros autorregresivo;  $W$  una matriz de ponderadores espaciales de tipo esfera de influencia;  $\varepsilon$  el término de error.

Los resultados se presentan en el cuadro 3.8, los coeficientes estimados son similares en signos, magnitud y significancia estadística.

En concordancia con la prueba LM los coeficientes autorregresivos  $\rho$  resultan significativos y, además, tienen signo positivo en el modelo SAR (0.185), SAC (0.004) y SDM (0.264). El coeficiente  $\lambda$  también es significativo y positivo en los modelos SEM (0.285) y SAC (0.279).

Para analizar la incidencia de las características de regiones vecinas en las emisiones locales se emplea en modelo SLX, en este modelo las variaciones en las variable *emis* son explicadas solo por las variables exógenas y sus respectivos rezagos espaciales, pero carece de un proceso autorregresivo y en vista de que  $\rho$  y  $\lambda$  son estadísticamente distintos de cero, este modelo produce estimadores sesgados e inconsistentes. De tal forma que el modelo SDM arroja información más precisa acerca de la incidencia de características de los vecinos sobre las emisiones locales.

Elhorst (2010) sugiere que si  $\lambda \neq 0$  y  $\rho \neq 0$  lo apropiado es adoptar un SDM por dos motivos. En primer lugar, sostiene que si bien el verdadero proceso generador de datos corresponde a un modelo de rezago espacial, o un modelo de error espacial, o bien, a un modelo de error espacial de Durbin, el SDM es la única forma de producir coeficientes insesgados. En segundo lugar, permite la obtención de efectos de *spillover* globales y locales. En ese respecto LeSage and Pace (2009) establecen que los modelos SAR y SEM pueden incluirse o considerarse como parte de un modelo más general como el SDM.

Dado lo anterior se evaluó la pertinencia del modelo SDM frente al resto. Al revisar el criterio de información de Akaike (AIC) se nota que el SDM tiene el menor AIC (46090) y por lo tanto una menor pérdida de información en comparación con el resto modelos. Considerando el ajuste del modelo a través del log-likelihood, SDM es el mejor por presentar el valor más alto (23028.14).

Puntualizando respecto a la decisión del modelo más apropiado:

- El modelo MCO es descartado a consecuencia de la dependencia espacial identificada con el I de Moran.
- La prueba LM confirmó la dependencia espacial en la variable endógena y en los errores, y aunque no descartó el SAR se inclinó a favor del SEM o SAC.
- De acuerdo con el AIC y el loglikelihood, el SDM tiene un mejor ajuste a los datos sobre el SAC y SEM.
- El SDM produce coeficientes insesgados y tiene una capacidad interpretativa superior al SAR y SEM.

- Con base en la evidencia anterior se seleccionó el SDM como el modelo más apropiado.

### 3.2.1. Interpretación de los resultados

Debido a los efectos endógenos los coeficientes del modelo SDM no pueden interpretarse directamente como la derivada parcial de la variable *emis* respecto a cada una de las variables explicativas, o sea en forma de cambio marginal. Por consiguiente se calcularon los impactos directos e indirectos, los cuales aparecen en cuadro 3.9.

Los resultados indican que el impacto directo del grado de urbanización es significativo, indicando que una mayor proporción de personas habitando en ciudades coadyuva a la contaminación del aire. Asimismo, el efecto indirecto del nivel de urbanización de las regiones vecinas resultó no significativo, que para efectos prácticos es cero por lo tanto no tiene efectos de difusión. Por su parte, el impacto total del grado de urbanización sobre las emisiones contaminantes es positivo y se compone principalmente del efecto directo, de manera que sociedades más urbanizadas contribuyen a la contaminación del entorno local.

Tal y como se esperaba la densidad del automóvil tiene un impacto directo positivo y significativo, lo cual confirma que un mayor número de vehículos contribuye a la degradación del aire. Contrario a lo esperado el efecto indirecto es negativo, lo cual dificulta su interpretación en términos económicos.

En cuanto a las actividades de consumo ambos efectos directos e indirectos son positivos y significativos. Esto sugiere que las emisiones contaminantes serán mayores en lugares donde haya mayores niveles de consumo. Poco más del 80 % del impacto total se compone de efectos directos.

En contraste con la población de las ciudades y la densidad del automóvil, la densidad población contribuye a la reducción de las emisiones. Como lo muestra Ahlfeldt and Pietrostefani (2019) mayores densidades desincentivan el uso del automóvil e implican menores distancias por recorrer y por ende los viajes pueden realizarse por medios de transporte alternos a los vehículos de combustión interna.

Cuadro 3.8: Coeficientes estimados de los modelos de regresión espacial

Variable	Variable emis				
	SAR	SEM	SAC	SLX	SDM
constante	696.07***	1054.5***	1042.8***	1516***	1075.2***
gu	12.884***	17.416***	17.33***	18.15***	18.185***
dens	-1.631***	-1.293***	-1.30***	-0.935***	-0.977***
motor	80.029***	91.282***	91.083***	91.01***	92.414***
consum	0.0267***	0.02676***	0.02677***	0.02981***	0.02839***
pbt_manuf	15.101***	19.005***	18.929***	18.35***	19.589***
ue	0.2974***	0.1885***	0.19114***	0.199***	0.17987***
eg_indx	20564***	18189**	18262**	18420***	17919**
lag.gu				-2.324	-7.494
lag.dens				-1.095***	-0.471
lag.motor				-42.740***	-60.134***
lag.consum				0.02726***	0.015
lag.pbt_manuf				-19.64**	-18.493**
lag.ue				0.468***	0.327***
lag.eg_indx				9139.0	1550.3
\rho	0.1849***		0.00474**		0.264***
\lambda		0.2849***	0.2787**		
Num. Obs.	2309	2309	2309	2309	2309
Parámetros	10	10	11	14	17
Log likelihood:	-23052.97	-23040.22	-23040.47		-23028.14
AIC (modelo lineal)	46204	46204	46204		46179
AIC(modelo espacial)	46126	46100	46103		46090
LR test: statistic	80.119	105.55	105.04		90.42
LR test: p-value	0.000	0.000	0.000		0.000

\*\*\*  $p < 0.01$ ; \*\*  $p < 0.05$ ; \*  $p < 0.1$

Cuadro 3.9: Efectos directos, indirectos y totales del modelo SDM

	Media	P - valor
<b>Efectos Directos</b>		
gu	18.0138	0.0000
dens	-1.0236	0.0000
motor	90.1473	0.0000
consum	0.0298	0.0000
pbt_manuf	18.7439	0.0001
ue	0.2036	0.0010
eg_indx	18317.25	0.0372
<b>Efectos Indirectos</b>		
gu	-3.4909	0.6138
dens	-0.9436	0.0030
motor	-46.2964	0.0009
consum	0.0295	0.0153
pbt_manuf	-17.2557	0.0972
ue	0.4855	0.0002
eg_indx	8131.35	0.3002
<b>Efectos Totales</b>		
gu	14.5229	0.0480
dens	-1.9671	0.0000
motor	43.8508	0.0023
consum	0.0593	0.0000
pbt_manuf	1.4882	0.9302
ue	0.6892	0.0000
eg_indx	26448.59	0.0526

La actividad manufacturera ejerce efectos directos positivos en las emisiones contaminantes, exponiendo que estas actividades son determinantes importantes de la contaminación local. Dentro de la manufactura hay actividades que son potencialmente más contaminantes que otras, como la industria petroquímica, la siderúrgica, la generación de energía, y la extracción de minerales, cementera, azucarera, automotriz entre otras, este tipo de actividades tiende a ubicarse lejos de los grandes centros urbanos haciendo que municipios pequeños y poco poblados tengan altos niveles de contaminación, tal es el caso de Fronteras y Nacoziari en Sonora, Namiquipa, Janos y Coronado en Chihuahua, por citar algunos, que con menos de quince mil habitantes mantienen emisiones equiparables con las delegaciones Iztacalco y Venustiano Carranza, o municipios como Torreón y Tlalnepantla de Baz. Respecto a los efectos indirectos no pasan la prueba de significancia al 1 % y 5 % y son estadísticamente cero de modo que no presenta efectos de *spillover*.

El número total de empresas ya sea una pequeña tienda o una gran fábrica que opera con instalaciones fijas incide positivamente en la generación de emisiones. El efecto indirecto asciende al doble del efecto directo, de modo que puede decirse que ejerce efectos de *spillover*.

De acuerdo con los efectos directos cuando hay una aglomeración considerable de la industria secundaria se tienen enormes efectos adversos sobre la calidad del aire local. Sin embargo, los efectos indirectos resultaron no significativos.

## Conclusiones del capítulo

En este capítulo se emplearon métodos de econometría espacial para determinar empíricamente la influencia de la aglomeración sobre las emisiones contaminantes. Los resultados muestran que las emisiones contaminantes exhiben autocorrelación espacial a nivel global y local. Además, la contaminación tiende a concentrarse en el espacio, formando conglomeraciones de municipios con altos niveles de contaminación del aire.

Los puntos *calientes* de contaminación (municipios con altos niveles de contaminación con vecinos cuyos niveles de contaminación también son altos) son alarmantes porque la calidad del aire impone diversos riesgos a la población. Las conglomeraciones se corresponden con las mayores aglomeraciones urbanas, las cuales suelen ser lugares de mayor desarrollo económico, como la ciudad de México, y otras grandes ciudades como Monterrey, Guadalajara, Tijuana, Torreón y San Luis potosí. Además, la región bajío que se extiende desde Querétaro, pasando por Guanajuato hasta Aguascalientes donde hay una fuerte presencia de la industria de fabricación de maquinaria y equipo. También, se identificaron como puntos *calientes* regiones cuyas actividades económicas son altamente contaminantes, tal es el caso de la región petrolera en el estado de Tabasco y las zonas mineras en Durango y Chihuahua.

Con el *I de Moran* se determinó la presencia de dependencia espacial, por lo tanto un modelo de MCO producirá coeficientes sesgados e inconsistentes, de tal forma que los modelos de regresión espacial se consideran los más adecuados para evaluar los efectos que variables asociadas a la aglomeración urbana ejercen sobre las variaciones en las emisiones contaminantes.

En lo referente a la estimación del modelo, se tiene que a partir de la prueba *I de Moran* se demostró la presencia de dependencia espacial corroborando que los MCO serán inconsistentes, por lo tanto, se estimaron modelos de regresión espacial. Con la intención de lograr la mejor especificación del modelo se realizó una prueba del multiplicador de Lagrange la cual se declinó en favor de los modelos SEM y SAC. La estimación de los modelos arrojó que los coeficientes de autocorrelación son estadísticamente distintos de cero, por lo tanto el modelo SDM fue considerado y finalmente, elegido como el mejor modelo.

El análisis con modelos econométricos constató que el grado de urbanización, la densidad del automóvil, la actividad manufacturera, las empresas con instalaciones fijas y la aglomera-

ción del sector secundario contribuyen considerablemente a la contaminación a nivel local. En cambio, la densidad poblacional reduce las emisiones contaminantes. Los resultados muestran que el consumo y el número de firmas tienen efectos de *spillover* sobre regiones vecinas.

## CAPÍTULO 4

### EXTENSIÓN DEL ANÁLISIS ECONÓMétrICO POR CONTAMINANTE

Hasta ahora el trabajo se ha desarrollado bajo la consideración de que en la atmósfera las sustancias químicas causantes de la degradación del aire se encuentran mezcladas, por consiguiente, se han sumado tres contaminantes para construir la variables *emis* a fin de reflejar ese hecho. En esta sección se desagrega la variable *emis* por contaminante  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $CO$ . Previamente se determinó autocorrelación espacial en cada uno de estos contaminantes, por lo tanto, se realiza una estimación de los modelos espaciales considerando a cada uno de estos como variable dependiente, se determina el mejor modelo que mejor se ajusta a los datos, luego se realiza la interpretación de los resultados.

#### 4.1. Análisis econométrico de las $PM_{10}$

Se llevó acabo una prueba del multiplicador de Lagrange con la finalidad de reconocer el grado de autocorrelación espacial presente en la variable dependiente o en el error y con ello determinar el modelo más adecuado. Los resultados (cuadro 4.1) indican que tanto el modelo del error como el del rezago espacial pasan la primera prueba de significancia. El modelo de error SEM falla la prueba robusta y es desestimado. Mientras que el modelo del rezago pasa la prueba de significancia al 10 %. Adicionalmente, el modelo SAC no puede descartarse.

Después de la prueba de Lagrange se estiman los modelos espaciales y sus resultados se resumen en el cuadro 4.2, lo cual permite comparar las estimaciones. En los modelos SAR se nota que el coeficiente autorregresivo  $\rho$  es positivo y significativo (0.23), lo cual implica

Cuadro 4.1: Diagnóstico del multiplicador de Lagrange para selección del modelo,  $PM_{10}$ 

	Estadístico	P-valor
LMerr	88.001	0.0000
RLMerr	2.0683	0.1504
LMlag	88.827	0.0000
RLMlag	2.894	0.0889
SAC	90.895	0.0000

Cuadro 4.2: Coeficientes estimados de los modelos de regresión espacial

Variable	Variable dependiente $PM_{10}$				
	SAR	SEM	SAC	SLX	SDM
constante	40.629	98.156***	190.42***	176.8***	134.34***
gu	2.4463***	3.0528***	3.325***	3.256***	3.2891***
dens	-0.1921***	-0.1935***	-0.1798***	-0.1877***	-0.1862***
motor	2.4362**	2.9412***	3.1384***	2.459**	2.6277**
consum	0.0014834**	0.0013218*	0.0011	0.0014*	0.0013*
pbt_manuf	4.4744***	5.0422***	5.2976***	5.109***	5.2836***
ue	0.0282***	0.023584**	0.018769*	0.02969***	0.02743***
eg_indx	1842.2	1810.6	1686.8	2024	1909.1
lag.gu				-0.5746	-1.4133
lag.dens				-0.0932*	-0.0271*
lag.motor				-2.5970	-3.0576
lag.consum				0.0033**	0.0025**
lag.pbt_manuf				-3.1750**	-3.684***
lag.ue				0.038**	0.0271**
lag.eg_indx				-440	-1262.4
\rho	0.23***		-0.2602***		0.237***
\lambda		0.247***	0.466***		
Num. Obs.	2309	2309	2309	2309	2309
Parámetros	10	10	11	14	17
Log likelihood:	-18887.81	-18887.32	-18885.57		-18880.25
AIC (modelo lineal)	37870	37870	37870		37863
AIC(modelo espacial)	37796	37795	37793		37794
LR test: statistic	75.91	76.893	80.399		70.64
LR test: p-value	0.000	0.000	0.000		0.000

\*\*\*  $p < 0.01$ ; \*\*  $p < 0.05$ ; \*  $p < 0.1$

que el rezago espacial endógeno es importante. De igual manera en el modelo SEM  $\lambda$  resulta significativo y positivo, por lo tanto el error espacial es importante. En el modelo SAC donde se combinan los procesos autorregresivos predomina el error espacial.

Debido a que  $\rho$  y  $\lambda$  son estadísticamente diferentes de cero, siguiendo a LeSage and Pace (2009) y Elhorst (2010) se verifica la conveniencia del modelo SDM. Se nota que el coeficiente  $\rho$  es positivo, significativo y de igual magnitud que en el modelo SAR, indicando que el rezago espacial endógeno es fundamental. Al igual que en el modelo SLX, los rezagos espaciales en las variables explicativas son significativas y por consiguiente importantes. Además, el SDM presenta el menor AIC (37863) y el mayor loglikelihood (-18880.25), esto apunta a que el SDM tiene el mejor ajuste entre los modelos, por lo tanto se concluye que es modelo más adecuado para representar la dependencia espacial.

#### 4.1.1. Impactos directo, indirecto y total

Los resultados (cuadro 4.3) sugieren que el grado de urbanización tiene un impacto significativo en las emisiones a nivel local, en consecuencia, conforme aumente el grado de urbanización también se incrementaran las  $PM_{10}$ . El efecto indirecto resultó no significativo, esto quiere decir que un incremento en la urbanización de municipios vecinos no influye en la contaminación local, por lo tanto el efecto total se compone completamente de efecto directo. La densidad poblacional se relaciona negativamente con las  $PM_{10}$  a nivel local, este resultado sugiere que incrementos en la densidad poblacional pueden contribuir a la reducción de este contaminante. El efecto indirecto es no significativo y por lo tanto, se puede decir que su efecto es nulo.

De igual manera el índice de motorización contribuye a la generación de estas partículas a nivel local, mientras que su efecto indirecto es no significativo, de modo que no incrementos en la densidad vehicular en regiones vecinas no influirán en la contaminación local por  $PM_{10}$ . Las actividades de consumo tienen efectos significativos en la generación de  $PM_{10}$  a nivel local y los efectos indirectos (significativos al 10 %) sugieren un comportamiento del *spillover*.

La influencia de la actividad manufacturera también es significativa y positiva de manera que contribuye a la generación de estas partículas contaminantes a nivel local. Los efectos indirectos son significativos al 10 %, sin embargo su coeficiente es negativo, esto sugiere que la instalación de nuevas plantas manufactureras en municipios vecinos atenúa la contaminación

local, tal situación se ajusta al caso en que la desconcentración de las plantas manufactureras de los centros industriales tradicionales hacia municipios vecinos puede reducir la generación local de emisiones.

. Por otra parte, el número de empresas instaladas tiene un efecto directo e indirecto significativo y positivo, por lo tanto un incremento en el número de empresas en municipios vecinos puede influir en la contaminación a nivel local. En contraste el índice de concentración del sector secundario resultó no significativo.

Cuadro 4.3: Efectos directos, indirectos y totales, modelo SDM

	Media	P - valor
<b>Efectos Directos</b>		
gu	3.2536	0.0000
dens	-0.1902	0.0000
motor	2.4915	0.0149
consum	0.0014	0.0608
pbt_manuf	5.1476	0.0000
ue	0.0293	0.0047
eg_indx	1863.82	0.2083
<b>Efectos Indirectos</b>		
gu	-0.7953	0.5049
dens	-0.0893	0.1481
motor	-3.0548	0.1816
consum	0.0036	0.0563
pbt_manuf	-3.0512	0.0615
ue	0.0422	0.0774
eg_indx	-1016.25	0.7699
<b>Efectos Totales</b>		
gu	2.4583	0.0259
dens	-0.2795	0.0000
motor	-0.5634	0.8187
consum	0.0050	0.0131
pbt_manuf	2.0964	0.2552
ue	0.0715	0.0038
eg_indx	847.57	0.8416

## 4.2. Análisis econométrico de las $PM_{2.5}$

En el análisis del material particulado de un tamaño inferior a  $2.5\mu m$  se procedió de la misma forma. Los resultados de la prueba del multiplicador de Lagrange se observan en el cuadro 4.4. Se aprecia que ambos modelos SAR y SEM pasan la primera prueba de significancia, sin embargo, fallan la prueba de significancia al 10%. Así que un modelo SAC con proceso autorregresivo endógeno y con proceso autorregresivo en el error parece ser el más apropiado.

Cuadro 4.4: Diagnóstico del multiplicador de Lagrange para la selección del modelo,  $PM_{2.5}$

	Estadístico	P-valor
LMerr	66.894	0.0000
RLMerr	1.537	0.215
LMlag	67.702	0.0000
RLMlag	2.3452	0.1257
SAC	69.239	0.0000

A continuación se estimaron los modelos espaciales y se resumieron los coeficientes estimados en el cuadro 4.5. Se muestra la misma situación que en el análisis anterior. El coeficiente  $\rho$  estimados por el modelo SAR es significativo y positivo (0.209). Por su parte el  $\lambda$  resulta significativo en los modelos SEM. En el modelo SAC, ambos  $\rho$  (0.044) y  $\lambda$  (0.184) resultan positivos y significativos al 10%. En este caso se podría elegir el modelo SAC debido a que las prueba LM desestimó el modelo de rezago y el modelo del error en favor de SAC. Al comparar los modelos observamos que  $\rho, \lambda \neq 0$ , y que el modelo Durbin presenta un mayor loglikelihood. Además, LeSage and Pace (2009) y Elhorst (2010) sostienen que el SDM sobrepasa y subsume a los modelos SAR y SEM, y en consecuencia es más conveniente.

### 4.2.1. Impactos directo, indirecto y total

El grado de urbanización se relaciona positivamente con la generación de  $PM_{2.5}$  de manera local, el efecto indirecto resultó no significativo, de modo que no ejerce efectos de *spillover*. El efecto directo de la densidad sugiere que contribuye a reducir las  $PM_{2.5}$ , pero los efectos indirectos resultaron no significativos. El índice de motorización resultó significativo y positivo, por lo tanto un incremento en el número de vehículos en circulación alienta la formación de estas partículas, mientras que el efecto indirecto no es significativo.

Cuadro 4.5: Coeficientes de los modelos de regresión espacial

Variable	Variable dependiente PM2.5				
	SAR	SEM	SAC	SLX	SDM
constante	43.843*	83.051***	73.561**	143.2***	111.3***
gu	1.9052***	2.3443***	2.2694***	2.557***	2.5909***
dens	-0.1472	-0.1479	-0.1485	-0.1423	-0.1423
motor	1.6654**	2.0648***	1.9989***	1.823**	1.9537**
consum	0.001393***	0.0013**	0.0013**	0.0014**	0.0013**
pbt_manuf	2.9693***	3.3317	3.2722***	3.417***	3.5243***
ue	0.023878***	0.0202***	0.021***	0.0236***	0.022012***
eg_indx	1425.2	1356.8	1375.7	1536	1416.2
lag.gu				-0.7648	-1.3113*
lag.dens				-0.061***	-0.0163
lag.motor				-2.679*	-2.8496*
lag.consum				0.0025**	0.0019
lag.pbt_manuf				-2.1050	-2.389**
lag.ue				0.0328	0.0244*
lag.eg_indx				653.6000	-107.21
\rho	0.2094***		0.044*		0.2169***
\lambda		0.2267***	0.184*		
Num. Obs.	2309	2309	2309	2309	2309
Parámetros	10	10	11	14	17
Log likelihood:	-18241.82	-18241.18	-18241.08		-18234.05
AIC (modelo lineal)	36562	36562	36562		36556
AIC(modelo espacial)	36504	36502	36504		36502
LR test: statistic	59.993	61.268	61.469		56.017
LR test: p-value	0.000	0.000	0.000		0.000

\*\*\* $p < 0.01$ ; \*\* $p < 0.05$ ; \* $p < 0.1$

Respecto a las manufacturas, se constató que contribuyen de forma significativa, de modo que una expansión del sector manufacturero conducirá a mayores niveles de  $PM_{2.5}$ . Se reconoció que esta variable no tiene efectos de *spillover*. Por otro lado, las actividades relacionadas con el consumo de bienes y la instalación de nuevas firmas tienden a incrementar los niveles de este contaminante, además que en ambos los efectos indirectos son significativos y positivos, lo cual indica efectos de *spillover*. Por otra parte, el índice de concentración geográfica resultó no significativo.

Cuadro 4.6: Efectos directos, indirectos y totales del modelo SDM

	Media	P - valor
<b>Efectos Directos</b>		
gu	2.5529	0.0000
dens	-0.1447	0.0000
motor	1.8306	0.0185
consum	0.0014	0.0125
pbt_manuf	3.4419	0.0000
ue	0.0235	0.0038
eg_indx	1426.29	0.1790
<b>Efectos Indirectos</b>		
gu	-0.9188	0.2952
dens	-0.0579	0.1331
motor	-2.9751	0.1085
consum	0.0026	0.0543
pbt_manuf	-1.9926	0.1180
ue	0.0358	0.0370
eg_indx	245.13	0.9404
<b>Efectos Totales</b>		
gu	1.6341	0.0526
dens	-0.2027	0.0000
motor	-1.1444	0.5577
consum	0.0040	0.0064
pbt_manuf	1.4493	0.2684
ue	0.0593	0.0013
eg_indx	1671.42	0.5674

### 4.3. Análisis econométrico del CO

El monóxido de carbono es uno de los contaminantes atmosféricos más comunes y constituye una proporción mayúscula de las emisiones generadas y liberadas al medio ambiente. La prueba de Lagrange (cuadro 4.6) expone que tanto SAR como SEM pasan la primer prueba de significancia, mientras que en las las pruebas robustas, el modelo de error pasa la prueba al 1 % y el modelo del rezago espacial pasa la prueba al 10 %, en este caso y siguiendo a Anselin (2005) se considera más apropiado el modelo con el menor p-valor que es el SEM. La prueba tambien considera conveniente al modelo SAC.

Cuadro 4.7: Diagnóstico del multiplicador de Lagrange para la autocorrelación espacial

	Estadístico	P-valor
LMerr	98.889	0.0000
RLMerr	34.053	0.0000
LMlag	68.624	0.0000
RLMlag	3.7867	0.0516
SAC	102.68	0.0000

Los resultados de los modelos se presentan en el cuadro 4.7 apropiado. Se aprecia que en el modelo SAR  $\rho$  es significativo, de igual manera el coeficiente  $\lambda$  del modelo SEM es significativo y positivo, en cambio en el modelo SAC,  $\rho$  resulta ser no significativo, mientras  $\lambda$  si lo es. El comparar los modelos se nota que en el SDM  $\rho$  es significativo y una magnitud mayor a la estimada por el SAR, además tiene el loglikelihood más alto entre los modelos y el AIC más bajo, por lo tanto se elige como el modelo que mejor maneja la autocorrelación.

#### 4.3.1. Impactos directo, indirecto y total

Del cuadro 4.8 se ve que el impacto directo del grado de urbanización es significativo, sugiriendo que se incrementarían las emisiones de CO en municipios donde se profundiza la urbanización. Según el impacto indirecto la urbanización de municipios vecinos no impactará en las emisiones de CO. El impacto directo e indirecto de la densidad son significativos y negativos, esto sugiere que municipios que experimenten una densificación de la población, o tengan como vecinos municipios donde aumenta la densidad poblacional verán una reducción

Cuadro 4.8: Coeficientes estimados de los modelos de regresión espacial

Variable	Variable dependiente CO				
	SAR	SEM	SAC	SLX	SDM
constante	653.66***	888***	853.14***	1196***	879.05***
gu	9.0049***	11.973***	11.878***	12.34***	12.298**
dens	-1.2506***	-0.97***	-1.0318***	-0.6045***	-0.6442***
motor	77.041***	85.893***	84.545***	86.72***	87.672***
consum	0.0242***	0.0244***	0.0246***	0.0269***	0.026***
pbt_manuf	7.7151**	10.297***	10.441***	9.826**	10.64**
ue	0.23604***	0.14969***	0.1591***	0.1458***	0.1326**
eg_idx	17017***	15115**	14232**	14860**	14657**
lag.gu				-0.9848	-4.1751
lag.dens				-0.9413***	-0.4974**
lag.motor				-37.46***	-52.358***
lag.consum				0.0214**	0.0122
lag.pbt_manuf				-14.36**	-12.52***
lag.ue				0.3968***	0.29154***
lag.eg_idx				8925	3791
\rho	0.1531***		0.0332		0.2357***
\lambda		0.2564***	0.2497***		
Num. Obs.	2309	2309	2309	2309	2309
Parámetros	10	10	11	14	17
Log likelihood:	-22562.69	-22550.23	-22549.67		-22536.94
AIC (modelo lineal)	45203	45203	45203		45177
AIC(modelo espacial)	45145	45120	45121		45108
LR test: statistic	59.62	84.889	85.919		71.315
LR test: p-value	0.000	0.000	0.000		0.000

\*\*\*  $p < 0.01$ ; \*\*  $p < 0.05$ ; \*  $p < 0.1$

de las emisiones, el magnitud del coeficiente indirecto es mayor que el directo lo cual sugiere un fuerte efecto de *spillover*.

La densidad del automóvil, como se esperaría, tiene una relación positiva y significativa con las emisiones de *CO*, además el efecto indirecto es significativo y de gran magnitud, sin embargo, el signo negativo diría que el aumento de la flota vehicular de municipios vecinos reducirá las emisiones locales de *CO*, lo cual es un resultado incongruente, a menos que el aumento en el número de vehículos en municipios vecinos se realice a costa de los vehículos locales. El consumo tiene efectos directos e indirectos positivos y significativos lo cual sugiere que municipios cercanos que experimente mayores niveles de consumo observarán un aumento de emisiones de *CO*.

La actividad manufacturera impacta negativamente en la calidad del aire a nivel local, sin embargo no tiene efectos de difusión, pues el impacto indirecto es no significativo. Además, el crecimiento en el número de firmas locales y en municipios vecinos alienta la generación de *CO*. Cuando hay un aumento importante en la concentración geográfica de la industria secundaria en algún municipios la calidad del aire local tiende a agravarse de manera considerable, pero no se difunde hacia áreas vecinas.

Cuadro 4.9: Efectos directo, indirecto y total, modelo SDM

	Media	P - valor
<b>Efectos Directos</b>		
gu	12.2274	0.0193
dens	-0.6803	0.0022
motor	8.5909	<2.22e-16
consum	0.0270	0.0000
pbt_manuf	10.0834	0.0192
ue	0.1506	0.0120
eg_indx	15060.54	0.0593
<b>Efectos Indirectos</b>		
gu	-1.5987	0.8763
dens	-0.8134	0.0061
motor	-39.7042	0.0012
consum	0.0230	0.0221
pbt_manuf	-12.5432	0.1582
ue	0.4044	0.0019
eg_indx	9077.85	0.8342
<b>Efectos Totales</b>		
gu	10.6287	0.1611
dens	-1.4937	0.0000
motor	46.2049	0.0001
consum	0.0500	0.0000
pbt_manuf	-2.4598	0.8303
ue	0.5549	0.0002
eg_indx	24138.39	0.5870

## Conclusiones del capítulo

En este capítulo se analizaron por separado las emisiones contaminantes que conforman la variable *emis*. En los tres casos, los coeficientes autorregresivos resultaron significativos y positivos, de manera que al comparar los modelos se reconoció que el modelo SDM sobrepasa a modelos como SAR y SAC que incluyen procesos autorregresivos endógenos. En general, los modelos responden de forma similar para cada contaminante individual que de forma agregada en la variable *emis*.

La interpretación de los impactos indirectos se dificulta cuando, por razones de signos, no se les puede dar un sentido económico consistente con la teoría, por ejemplo, afirmar que un crecimiento de la flota vehicular en municipios adyacentes inducirá un declive en las emisiones locales es poco congruente. No obstante estos resultados no son incorrectos, sino que la interpretación de los resultados es compleja debido a que cambios en las variables explicativas originan efectos una serie de retroalimentaciones simultáneas que producen un nuevo estado estacionario equilibrio (LeSage, 2008). Por otro lado, las variables que tienen efectos de *spillover* son la densidad poblacional, el consumo de bienes y servicios, y el número de firmas con instalaciones fijas perteneciente a cualquier sector.

---

## CONCLUSIONES GENERALES

La contaminación del aire es uno de los problemas más graves que padecen las ciudades alrededor del mundo, situación que representa riesgos para la salud humana, reduce la calidad de vida de sus habitantes e impacta negativamente en la productividad de la fuerza laboral. Las ciudades se cuentan entre los mayores contribuidores a las emisiones contaminantes y esa condición esta ligada con la aglomeración económica, puesto que fabricas, edificios, vehículos y personas demandan una gran cantidad de recursos naturales y energéticos para su funcionamiento, al mismo tiempo que emiten enormes volúmenes de emisiones contaminantes. En consecuencia, la dinámica en ciudades juega un papel crucial en la reducción o acentuación de la contaminación del aire.

En México, la industrialización y el proceso de urbanización son fenómenos que se encuentran ligados temporal y espacialmente. Las economías de aglomeración centralizaron las actividades manufactureras en las principales ciudades del país a lo largo del siglo XX y el posterior proceso de relocalización de las manufacturas hacia las ciudades pujantes del centro y norte del país motivaron a su vez la concentración de la población y el surgimiento de numerosas actividades comerciales y de servicios en las ciudades propiciando su expansión física y con ello, el aumento de las distancias recorridas por la fuerza laboral hacia los sitios de trabajo y hacia los lugares de consumo, siendo los vehículos privados el medio de transporte primordial para la movilidad de personas y mercancías. De manera progresiva, este proceso condujo a la formación de las grandes aglomeraciones urbanas del país.

En esta investigación, el análisis a través del estadístico *I de Moran* confirmó que las emisiones están espacialmente autocorrelacionadas de modo global y local. La identificación de *clusters* o puntos *calientes* reveló que la contaminación del aire se concentra en las principales aglomeraciones urbanas del país, entre las más representativas se encuentran las zonas metropolitanas de la Ciudad de México, Monterrey, Guadalajara, Tijuana, Mexicali, La Laguna, Aguascalientes, León, Querétaro, Toluca, las cuales enfrentan graves problemas, pues el aire que respiran sus habitantes es nocivo para la salud. Otro hallazgo importante son los corredores regionales de contaminación, dicho de otro modo, conglomerados de municipios con altos niveles de contaminación. Esto implica que la contaminación no es un fenómeno autocontenido ni localizado de forma aislada.

Los altos niveles de contaminación pueden actuar como una deseconomía de aglomeración o fuerza centrífuga para la población y comprometer la capacidad de estas aglomeraciones urbanas para mantener o atraer fuerza de trabajo especializada, al mismo, repercutir negativamente en las actividades en actividades relacionadas con la recreación y el turismo.

Este hecho es relevante porque una buena parte de las emisiones contaminantes pueden atribuirse a una causa en general, el tamaño de la economía. Diferentes aspectos socioeconómicos de las ciudades juegan un papel importante, por ejemplo, las actividades de producción, consumo, y transporte, que por la magnitud que adquieren en las ciudades contribuyen en mayor medida a la generación de emisiones y la consecuente degradación ambiental.

En el análisis econométrico se determinó que el modelo SDM es el que mejor se ajusta a los datos y, por lo tanto, se empleó para estimar la incidencia de factores socioeconómicos en la generación de emisiones contaminantes. Se encontró que el grado de urbanización, la densidad del automóvil, la actividad manufacturera, las empresas con instalaciones fijas y la aglomeración del sector secundario tienen una influencia significativa sobre la contaminación a nivel local (efecto directo). Por su parte los efectos de *spillover* resultaron ser más débiles o no significativos.

Los resultados obtenidos concuerdan con estudios previos en que las manufacturas, la urbanización, la densidad del automóvil, la aglomeración de la industria contribuyen a la contaminación. Una diferencia notoria se haya en la densidad poblacional, pues en estudios previos se encontró que ejerce un impacto positivo en la contaminación del aire, mientras que este

trabajo concluye que la densidad puede atenuar la contaminación(Liu et al.,2014; Cheng et al.,2017). Reconociendo que los factores naturales inciden en la concentración de sustancias contaminantes Liu et al. (2017) concluyó que las áreas verdes y la velocidad del viento diluyen esas concentraciones. Adicionalmente, a diferencia de otros estudios como Li et al. (2014) y Fang et al. (2015) donde únicamente se mide la influencia del sector secundario, en esta tesis se ha contemplado la incidencia de las actividades económicas instaladas pertenecientes a cualquier sector y se determinó que ejercen un impacto positivo en la contaminación.

El trabajo aporta elementos para entender el vínculo entre la contaminación del aire y la dinámica de las aglomeraciones urbanas, bajo el entendido de que los desafíos medioambientales que enfrenta la sociedad actual se requiere de conocimiento científico técnico que contribuya al diseño de políticas públicas más asertivas encausadas a mejorar la calidad del aire y lograr la sustentabilidad ambiental.

En la formulación de políticas para reducir la contaminación del aire, considerando los siguientes aspectos:

- La autocorrelación espacial indica que la contaminación de un lugar esta condicionado en cierta medida por la contaminación de sus vecinos. En consecuencia, se requiere de coordinación, y correspondencia entre el actuar de los gobiernos nacionales y subnacionales responsables de reducir la contaminación. Acciones aisladas y sin sustento técnico resultarán menos eficientes y elevaran el costo de oportunidad de los recursos.
- La velocidad del proceso de urbanización sobrepasa la construcción de infraestructura básica y la capacidad de organizar el crecimiento urbano. Se requiere que los gobiernos locales mejoren sus prácticas de planeación urbana bajo objetivos de sustentabilidad. Reorientar el crecimiento urbano bajo el modelo de ciudades compactas presupone: 1) un uso intensivo del suelo urbano, lo cual implica beneficios económicos en la medida en que las zonas residenciales y comerciales se encuentran mezcladas facilitando la accesibilidad a los bienes y servicios; 2) mayores densidades conllevan un menor costo en la provisión de servicios públicos. Los puntos anteriores pueden contribuir a reducir los niveles de contaminación en la medida en que reducen el número de desplazamientos y las distancias recorridas hacia los centros de trabajo y de consumo, reduciendo la necesidad del automóvil y alentando su sustitución por medios de transporte limpios como la bicicleta, además se favorece a un uso mas eficiente de la energía. Adicionalmente, la

expansión de áreas verdes puede contribuir a reducir la concentración de contaminantes del aire.

- La densidad de los vehículos privados tiene un impacto significativo en la contaminación del aire, por lo tanto debiera contemplarse la construcción de infraestructura pública que favorezca al transporte colectivo eficiente, y promover el uso de medios de transporte alternativos que no utilicen combustibles fósiles, con la finalidad de desalentar el uso del automóvil. Asimismo, la construcción de infraestructura urbana que conecte las zonas centrales de las ciudades con las periferias urbanas y con sus áreas de influencia rurales puede conducir a un mayor aprovechamiento de las economías de aglomeración.
- Las actividades secundarias también contribuyen de manera significativa a la contaminación, en ese respecto puede decirse que la transferencia de fábricas y otras instalaciones industriales a las afueras de la ciudad no tiene un impacto en la generación de contaminantes si no se acompaña con la introducción de tecnologías que emitan menos gases contaminantes por unidad de producto. Vale decir que la relocalización de una fábrica de un municipio a otro sin mejoras tecnológicas no contribuirá a la reducción global de las emisiones, pero sí a la reducción de la contaminación en el municipio que expulsa esa instalación.

Dentro de las limitantes del trabajo se encuentra la disponibilidad de datos con relación a su periodicidad y desagregación espacial. En el primer caso, los datos de emisiones son publicados ocasionalmente, siendo lo deseable una publicación anual que permita su estudio a través del tiempo. Respecto al nivel de desagregación espacial, ocurre que ciertos datos solamente se encuentran agregados a nivel estatal, es el caso del Producto Interno Bruto (PIB). Además, la disponibilidad de los datos a niveles agregados limita la construcción de indicadores, pues con frecuencia la conformación de índices a nivel municipal requiere de datos a nivel localidad, por ejemplo los índices de aglomeración o bien, de especialización, emplean como insumos datos de empleo o producción en determinada industria pertenecientes a un municipio.

Si bien esta investigación ha podido dar cuenta de algunas relaciones entre la aglomeración económica y urbana, y la contaminación del aire, el estudio de estas abre la puerta para más investigaciones que analicen aspectos específicos de esta dinámica. Por ejemplo, se puede expandir el modelo con nuevas variables que capturen la influencia de ciertas industrias en específico, o bien separar el efecto de las industrias ligeras de las pesadas, también, pudiera analizarse la influencia de las inversión extranjera directa. Además, posibles trabajos futuros

podrían conducir el análisis a un nivel regional, también cabe la posibilidad de incorporar otros cortes en tiempo y realizar un análisis con panel de datos espacial.

## Bibliografía

- Ahlfeldt, G. M. and Pietrostefani, E. (2019). The economic effects of density: A synthesis. *Journal of Urban Economics*, 111:93–107.
- Alonso, W. (1971). The economics of urban size. *Papers in Regional Science*, 26(1):67–83.
- Annez, P. C. and Buckley, R. M. (2009). Urbanization and growth: Setting the context. *Urbanization and growth*, 1:1–45.
- Anselin, L. (1988). *Spatial Econometrics: Methods and Models*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Anselin, L. (1995). Local indicators of spatial association—lisa. *Geographical analysis*, 27(2):93–115.
- Anselin, L. (2001). Spatial econometrics. *A companion to theoretical econometrics*, 310330.
- Anselin, L. (2005). Exploring spatial data with geodtm: a workbook. *Center for spatially integrated social science*.
- Anselin, L. (2013). *Spatial econometrics: methods and models*, volume 4. Springer Science & Business Media.
- Berry, B. J. (2008). Urbanization. In *Urban ecology*, pages 25–48. Springer.
- Brunsdon, C. and Comber, L. (2015). *An introduction to R for spatial analysis and mapping*. Sage.
- Capello, R. and Camagni, R. (2000). Beyond optimal city size: an evaluation of alternative urban growth patterns. *Urban studies*, 37(9):1479–1496.
- Cheng, Z. (2016). The spatial correlation and interaction between manufacturing agglomeration and environmental pollution. *Ecological indicators*, 61:1024–1032.
- Cheng, Z., Li, L., and Liu, J. (2017). Identifying the spatial effects and driving factors of urban pm<sub>2.5</sub> pollution in china. *Ecological Indicators*, 82:61–75.
- Cho, H.-S. and Choi, M. J. (2014). Effects of compact urban development on air pollution: Empirical evidence from korea. *Sustainability*, 6(9):5968–5982.
- Combes, P.-P., Duranton, G., and Gobillon, L. (2019). The costs of agglomeration: House and land prices in french cities. *The Review of Economic Studies*, 86(4):1556–1589.

- Elhorst, J. P. (2003). Specification and estimation of spatial panel data models. *International regional science review*, 26(3):244–268.
- Elhorst, J. P. (2010). Applied spatial econometrics: raising the bar. *Spatial economic analysis*, 5(1):9–28.
- Ellison, G. and Glaeser, E. L. (1997). Geographic concentration in us manufacturing industries: a dartboard approach. *Journal of political economy*, 105(5):889–927.
- Fang, C., Liu, H., Li, G., Sun, D., and Miao, Z. (2015). Estimating the impact of urbanization on air quality in china using spatial regression models. *Sustainability*, 7(11):15570–15592.
- Fang, C. and Yu, D. (2017). Urban agglomeration: An evolving concept of an emerging phenomenon. *Landscape and Urban Planning*, 162:126–136.
- Frenken, K., Van Oort, F., and Verburg, T. (2007). Related variety, unrelated variety and regional economic growth. *Regional studies*, 41(5):685–697.
- Fujita, M., Krugman, P. R., and Venables, A. (1999). *The spatial economy: Cities, regions, and international trade*. MIT press.
- Fujita, M. and Thisse, J.-F. (1996). Economics of agglomeration. *Journal of the Japanese and international economies*, 10(4):339–378.
- Glaeser, E. L. and Gottlieb, J. D. (2009). The wealth of cities: Agglomeration economies and spatial equilibrium in the united states. *Journal of economic literature*, 47(4):983–1028.
- Glaeser, E. L. and Kahn, M. E. (2010). The greenness of cities: carbon dioxide emissions and urban development. *Journal of urban economics*, 67(3):404–418.
- Gong, X., Gao, J., and Liang, X. (2019). Inter-city spillover and intra-city agglomeration effects among local labour markets in china. *Available at SSRN 3381453*.
- Hanley, N., Shogren, J. F., and White, B. (1997). The economy and the environment: Two parts of a whole. In *Environmental Economics in Theory and Practice*, pages 1–21. Springer.
- Henderson, J. V. (1974). The sizes and types of cities. *The American Economic Review*, pages 640–656.
- IPCC (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis*. Ginebra, Suiza.
- Kahn, M. E. (2010). New evidence on trends in the cost of urban agglomeration. In *Agglomeration economics*, pages 339–354. University of Chicago Press.

- Kampa, M. and Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. *Environmental pollution*, 151(2):362–367.
- Kominers, S. (2008). Measuring agglomeration.
- Krugman, P. (1991). Increasing returns and economic geography. *Journal of political economy*, 99(3):483–499.
- LeSage, J. and Pace, R. K. (2009). Introduction to spatial econometrics: Crc press. Boca Raton, FL.
- LeSage, J. P. (2008). An introduction to spatial econometrics. *Revue d'économie industrielle*, (123):19–44.
- Li, Q., Song, J., Wang, E., Hu, H., Zhang, J., and Wang, Y. (2014). Economic growth and pollutant emissions in china: a spatial econometric analysis. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 28(2):429–442.
- Liu, H., Fang, C., Zhang, X., Wang, Z., Bao, C., and Li, F. (2017). The effect of natural and anthropogenic factors on haze pollution in chinese cities: A spatial econometrics approach. *Journal of cleaner production*, 165:323–333.
- Martínez-Bravo, M. and Martínez-del Río, J. (2019). Urban pollution and emission reduction.
- Melitz, M. J. and Ottaviano, G. I. (2008). Market size, trade, and productivity. *The review of economic studies*, 75(1):295–316.
- Moretti, E. (2004). Workers' education, spillovers, and productivity: evidence from plant-level production functions. *American Economic Review*, 94(3):656–690.
- Nijkamp, P. (1997). Environmental and regional economics. *Research Memorandum*, 1997:27.
- OECD (2016). *The Economic Consequences of Outdoor Air Pollution*.
- Ord, J. K. and Getis, A. (1995). Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application. *Geographical analysis*, 27(4):286–306.
- Parr, J. B. (2007). Spatial definitions of the city: four perspectives. *Urban Studies*, 44(2):381–392.
- Polèse, M. and Rubiera, F. (2009). Economía urbana y regional. introducción a la geografía económica. *Investigaciones Regionales*, 18:221–227.

- Puga, D. (2010). The magnitude and causes of agglomeration economies. *Journal of regional science*, 50(1):203–219.
- Richardson, H. W. (1995). Economies and diseconomies of agglomeration. In *Urban agglomeration and economic growth*, pages 123–155. Springer.
- Rosenthal, S. S. and Strange, W. C. (2001). The determinants of agglomeration. *Journal of urban economics*, 50(2):191–229.
- Strange, W. C. (2008). Urban agglomeration.
- Tietenberg, T. H. and Lewis, L. (2016). *Environmental and natural resource economics*. Routledge.
- Tisdale, H. (1942). The urbanization process. *Social Forces*, 20(3):311–316.
- UN (2018). *The Sustainable Development Goals Report 2018*.
- UN (2019). *World Urbanization Prospects 2018: Highlights*.
- Varian, H. R. (2014). *Intermediate microeconomics with calculus: a modern approach*. WW Norton & Company.
- Verhoef, E. T. and Nijkamp, P. (2002). Externalities in urban sustainability: environmental versus localization-type agglomeration externalities in a general spatial equilibrium model of a single-sector monocentric industrial city. *Ecological Economics*, 40(2):157–179.
- WHO (2018). Calidad del aire y salud. [urlhttps://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).