

Modelo de Demanda de Usos del Suelo para Bogotá y los Municipios de la Sabana  
Word Count: 7252

Corresponding Author:

Orlando Esteban Clavijo

Universidad de los Andes

oe.clavijo911@uniandes.edu.co

Daniel Páez Barajas

Universidad de los Andes

dpaez@uniandes.edu.co

## 1 **ABSTRACT**

2 La planificación urbana induce a un proceso de toma de decisiones y para las autoridades  
3 es necesario evaluar el impacto de las políticas de transporte y de usos del suelo antes de su  
4 implementación. Estas decisiones requieren un análisis técnico, económico y social que traen  
5 consigo efectos sobre la demanda y la localización de los usos del suelo. Es por esto que alrededor  
6 del mundo se han desarrollado una serie de modelos de usos del suelo y cambio de cobertura  
7 (LUCC), como una forma de estimar los efectos que generarán estas decisiones. Estos modelos  
8 se han desarrollado, entre otros, con autómatas celulares. Sin embargo, para poder llevarlos a cabo  
9 estos requieren cierta información como la demanda de uso del suelo en un espacio temporal. Este  
10 documento presenta un modelo de estimación de la demanda de los usos del suelo residencial,  
11 comercial e industrial en la ciudad de Bogotá y en los municipios de la Sabana Occidente (Funza,  
12 Mosquera, Madrid, Facatativá, Soacha y Cota) para un modelo de Autómata Celular que incorpora  
13 variables de transporte, espaciales y macroeconómicas propias de cada uso. El modelo se  
14 desarrolló a nivel de UPZ, con un análisis de regresión lineal en dos fases, la primera a través de  
15 regresiones de Mínimos Cuadrados Ordinarios, la cual fue utilizada para evaluar la significancia  
16 global y local de todas las variables y la segunda a través de regresiones geográficamente  
17 ponderadas (GWR) con las cuales se realizó la estimación para el año 2040. Se realizó validación  
18 del modelo a través de datos en dos espacios temporales. Adicionalmente, se establecieron  
19 escenarios de demanda basados en diferentes visiones en cuanto al desarrollo de proyectos de  
20 infraestructura de transporte en la región. Por un lado un escenario basado en un desarrollo de  
21 infraestructura vial y otro escenario con desarrollo de infraestructura vial y ferroviaria. Los  
22 resultados arrojan número de celdas por UPZ en los respectivos usos en el 2040 y pueden ser  
23 utilizados como parámetro de entrada en el modelo de usos del suelo desarrollado para la región.  
24 Se encontró que las demandas estimadas a través de lo desarrollado incluyen dinámicas excluidas  
25 en una aproximación tendencial, como lo son las variables espaciales y de acceso a la  
26 infraestructura de transporte. Adicionalmente se muestra la demanda generada en los usos de suelo  
27 a partir de la inclusión de nuevos proyectos de transporte. Futuros estudios se proponen en el área  
28 de integración de tiempos de viaje, densidades, división del ingreso y restricciones por los planes  
29 de ordenamiento territorial.

30 **Keywords:** Land-Use Demand, Demand Forecast, Cellular Automata, Land Use

## 1 INTRODUCTION

2 En la planeación urbana se es necesario estimar los efectos de ciertas decisiones y  
3 programas sobre el territorio especialmente sobre los usos del suelo (Myung-Jin, 2005). Esto  
4 debido a que dichas decisiones pueden llegar a influir las dinámicas de la ciudad tanto en su  
5 estructura urbana como en su movilidad. De manera que, proyectar los futuros patrones de usos de  
6 suelo suele estar acompañado de factores económicos, políticas públicas, transporte urbano, entre  
7 otros (Myung-Jin, 2005).

8 Las ciudades latinoamericanas han experimentado un rápido crecimiento en los últimos  
9 años (CAF, 2011). El aumento de la población en las ciudades las ha obligado a adaptarse para  
10 lograr responder a todas las demandas de calidad de vida (CAF, 2011). Sistemas de transporte,  
11 equipamientos, parques, entre otros, son los grandes desafíos de estas ciudades en desarrollo. Es  
12 por esto que, las grandes urbes del país que han tenido que generar cambios radicales en los últimos  
13 20 años y en donde la diferencia de desarrollo se pueden ver notablemente, estas son: Bogotá y  
14 Medellín.

15 En Medellín, luego de varios años de uso del metro de la ciudad como principal sistema de  
16 transporte masivo se integró con nuevos sistemas complementarios a este como el Metrocable,  
17 Metroplus y el tranvía, mostrando el esfuerzo del gobierno local por generar una ciudad enfocada  
18 hacia la buena planeación de políticas de transporte y desarrollo sostenible siendo reconocida  
19 internacionalmente a través de premios como la ciudad más innovadora en el 2013 (Starkey, 2013).  
20 En contraste está Bogotá que en 1998 implementó dentro del plan de desarrollo de ese gobierno la  
21 implementación del sistema de transporte masivo Transmilenio como respuesta para mejorar la  
22 movilidad debido a los largos tiempos de viaje que se estaban presentando en la ciudad, así como  
23 la alta contaminación por las emisiones vehiculares (Suzuki, Cevero, & Luchi, 2014).

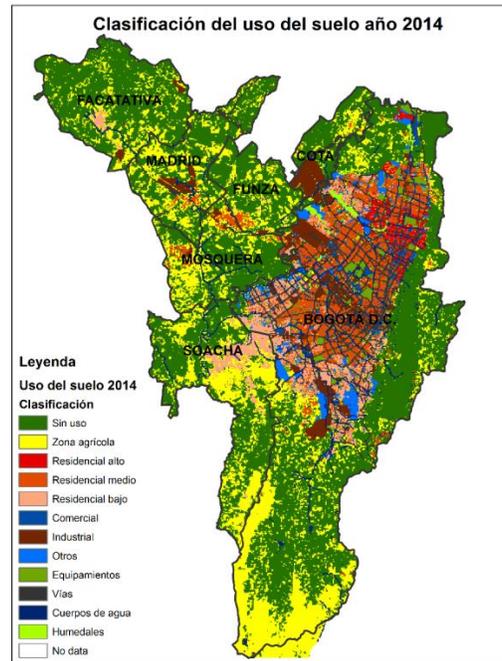
24 Esta apuesta por un sistema BRT (Bus Rapid Transit) en la ciudad fue un éxito, además de  
25 mejorar la movilidad ayudó al desarrollo del mercado inmobiliario lo que le hizo ser reconocido y  
26 emulado en otras partes del mundo (Suzuki, Cevero, & Luchi, 2014). Su efecto se logró evidenciar  
27 mejor en los corredores de la fase II que en los de la fase I, debido a que en estos habían lotes  
28 vacantes que fueron incentivados al desarrollo, mientras, que en los corredores construidos en la  
29 fase I por la carencia de estos lotes no fue posible un gran desarrollo (Suzuki, Cevero, & Luchi,  
30 2014).

31 Lo anterior muestra que la planeación de políticas de transporte pueden generar un gran  
32 impacto en las dinámicas de las ciudades, más si su planeación están acompañadas de un adecuado  
33 proceso de desarrollo de usos del suelo en la ciudad (Zhao & Peng, 2012). Es por esto que es de  
34 suma importancia saber el comportamiento de los usos del suelo dada una decisión de inversión  
35 en cualquier proyecto de transporte, puesto que este generará un impacto en la accesibilidad que  
36 influencia el comportamiento del mercado inmobiliario, localización de zonas residenciales,  
37 comerciales, precios del suelo y densidades (Waddella, Ulfarssonb, Franklinc, & Lobb, 2007).

38 Con base en lo anterior, es importante determinar el impacto de los planes o políticas de  
39 transporte en la ciudad en algo más allá de la mejora de tiempos de viajes y accesibilidad. Es decir,  
40 es importante estimar el impacto de las decisiones que tomen las autoridades en el comportamiento  
41 de los usos del suelo y más aún en la demanda de cada uno de los usos en la ciudad. De manera  
42 que este impacto apoye en la toma de decisiones de las autoridades con base en el futuro desarrollo  
43 que se genere en la ciudad producto de las decisiones. Adicionalmente, sería posible observar el  
44 comportamiento de los usos del suelo puede llegar a ser insumos para los modelos de transporte

1 de las ciudades, debido a que la demanda de viajes para los proyectos nuevos se ve determinada  
2 por la distribución de los usos del suelo (Zhao & Peng, 2012).

3 Dada la necesidad de evaluar el impacto de los programas de transporte, en Bogotá la  
4 Universidad de los Andes en cooperación con la Agencia Francesa de Desarrollo (AFD) se  
5 encuentran desarrollando un modelo el cual permite evaluar el impacto de programas de transporte  
6 en los usos del suelo, así como el impacto de las políticas de usos de suelo en la estructura urbana  
7 de la ciudad y la región metropolitana. Este modelo se desarrolla con base a una metodología de  
8 Autómata Celular, que busca representar la región mediante celdas de 100m x 100 m las cuales  
9 tienen un uso específico como se puede observar en la *Figura 1*.



10

11 *Figura 1. Mapa de usos del suelo (2014) para Bogotá y Sabana Occidente Fuente: Grupo SUR*

12 Este modelo requiere de varios parámetros para su ejecución como se puede ver en la *Figura*  
13 2, dentro de estos se encuentra además de los usos del año base a modelar, zonas de restricción,  
14 zonas de idoneidad y la demanda de cada uso de suelo en la región de modelación. Este modelo  
15 trabaja con la demanda estimada para el año horizonte de modelación y la localiza basándose en  
16 la interacción con el vecindario y ciertas reglas de transición (Van Vliet, Hurkens, White, & van  
17 Delden, 2012).



Figura 2. Parámetros de entrada Modelo AC Bogotá Elaboración Propia

Dado lo anterior, el modelo de usos de suelo que fue desarrollado en el software Metronamica, se puede entender como una interacción oferta-demanda donde se introduce la demanda en número de celdas por cada uno de los usos y dadas las distintas condiciones ya mencionadas se calcula la oferta de suelo, dando como resultado la interacción de equilibrio. Por lo anterior, la demanda se constituye en un insumo importante en el modelo y es necesario que su estimación sea lo más precisa posible. Por tal motivo, es necesario desarrollar un modelo que permita estimar de la demanda de cada uno de los usos de suelo para el modelo de autómatas celulares, que incluya la mayor cantidad de variables explicativas para que la proyección sea lo más acertada posible.

Este documento presenta un modelo de estimación de la demanda de los usos del suelo residencial, comercial e industrial en la ciudad de Bogotá y en los municipios de la Sabana Occidente (Funza, Mosquera, Madrid, Facatativá, Soacha y Cota) para un modelo de Autómata Celular que se desarrolló en la Universidad de los Andes. El modelo de demanda se desarrolla a partir de la necesidad identificada de establecer una metodología que integre la demanda de usos de suelo derivada de los nuevos proyectos de infraestructura junto con variables económicas y espaciales. Adicionalmente se busca que esta metodología sea desarrollable en otros modelos de demanda alrededor del mundo, donde las aproximaciones de estimaciones de la demanda de usos del suelo no se han realizado con la rigurosidad requerida.

El modelo de demanda se realizó partiendo de aproximaciones realizadas tanto para los modelos de AC desarrollados en otras partes del mundo, como los económicos. La metodología utilizada constó de dos procesos, el primero una regresión por Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) que ayudó a determinar las variables relevantes en cada uno de los usos modelados a un nivel de detalle de UPZ (Unidad de Planificación Zonal), seguido de una regresión espacial Geográficamente Ponderada (GWR) que determinó ecuaciones para cada una de las UPZ en cada uso. Los resultados fueron validados con datos de otro año y se evaluó el poder predictivo de cada uno. Los resultados muestran la estimación de la demanda para cada uno de los usos del suelo en el 2040 en diferentes escenarios, los cuales incluyen variables que identifican dinámicas omitidas

1 por las estimaciones tendenciales constituyendo este modelo como más preciso a diferencia como  
2 se desarrolla actualmente para algunos modelos de autómata celular.

### 3 **CONTEXTO**

4 Alrededor del mundo para los modelos de demanda de usos del suelo se han realizado  
5 diversas aproximaciones, por un lado como insumo de los modelos de Autómata Celular (AC)  
6 como los pretende ser este modelo desarrollado, por otro lado, los que buscan responder a la  
7 necesidad de análisis económico del comportamiento del mercado inmobiliario en las ciudades.  
8 De manera que, los primeros que surgen como respuesta al aumento del uso de los modelos de AC  
9 en los estudios urbanos tras la aparición de los computadores y de los datos geográficos en los  
10 últimos años. Estos buscan microsimular el desarrollo de los usos del suelo, su transición y la  
11 expansión urbana que se genera (Torrens, 2002).

12 Es por esto que, estas simulaciones se rigen dados unos parámetros de simulación que  
13 dependen de la información de entrada con la cual basan su comportamiento como se puede ver  
14 en la *Figura 2*, de manera que, los sistemas AC solo se concentran en la transición de cada uno de  
15 sus entes celulares estos no pueden reflejar aspectos socioeconómicos y el proceso de toma de  
16 decisiones se realiza sin información adicional (Zhao & Peng, 2012). Sin embargo, muchas veces  
17 estos aspectos socioeconómicos se incluyen a través de los parámetros de entrada como la  
18 proyección de la demanda para cada uno de los modelos.

19 Por ejemplo, una de estas es proyecciones es con base a la población y a su estimación su  
20 crecimiento que generalmente están dados por los departamentos de estadística de cada país. En  
21 un modelo desarrollado en el software Metronamica para la cuenca del Mar Negro se tuvieron en  
22 cuenta tres escenarios de crecimiento donde se utilizó la estimación de la población en un nivel  
23 regional (NUTS2) y se proyectó con base a la tendencia de densidades que se dividían en alto,  
24 medio y bajo (Mancosu et. al, 2015).

25 Esta tendencia de las densidades se obtuvo mediante el análisis del cambio en la cobertura  
26 de uso de suelo entre dos tiempos sumada a la proyección de las densidades urbanas lo que resultó  
27 en un crecimiento esperado por uso de aproximadamente del 1% anual en la densidad alta y  
28 decrecimiento del mismo valor en la densidad baja (Mancosu et. al, 2015). Esta estimación de  
29 demanda, posee la desventaja que fue realizada con base a una proyección de población en donde  
30 sólo se tiene en cuenta factores de nacimientos y muertes sin incluir aspectos como la migración  
31 ni comportamientos macroeconómicos. Lo anterior constituye una falla porque son aspectos  
32 determinantes en la demanda de área para cada uso (Van Vliet et. al, 2013).

33 Sin embargo, la práctica de tomar el comportamiento de la población y de ciertos aspectos  
34 económicos no es desconocido y se acostumbra a realizar frecuentemente en las simulaciones de  
35 usos del suelo, en las cuales, se asume que el uso del suelo residencial se comporta como lo hace  
36 la población pues estos son los que mueven la demanda en este uso, mientras los demás se estiman  
37 bajo comportamientos económicos (White & Engelen, 1997). Pero, algunos modelos en otros  
38 software y técnicas de simulación se han esforzado por obtener una demanda más precisa que  
39 incluye varios factores, unos empiezan desde estimaciones calibradas con usos en dos tiempos  
40 hasta cálculos estimados en el movimiento de las economías entre regiones (White & Engelen,  
41 2000).

42 Un ejemplo básico de estimación de la demanda de manera diferente a la mencionada es la  
43 del modelo desarrollado en Irán donde se proyectó a partir de la calibración de información en dos  
44 tiempos mediante la ecuación formulada:

$$45 \quad A_n = A_0 * (1 + r)^n \quad (1)$$

1 Donde  $A_n$  es el área requerida en un año determinado,  $A_0$  el área en el año base,  $r$  la tasa  
2 de crecimiento de la demanda y  $n$  el número de años (Sharifia, Karimib, & Mesgari, 2012). En  
3 esta investigación, con información de 1986 y de 1998 se estimó el parámetro  $r$  asumiendo que el  
4 comportamiento de la demanda de uso del suelo seguirá de acuerdo a lo ocurrido en ese lapso de  
5 tiempo (Sharifia, Karimib, & Mesgari, 2012). Cabe resaltar que este un método inexacto dado que  
6 se asume que el comportamiento se mantiene como se ha presentado y no se sabe cuáles variables  
7 influyen este crecimiento, pero, de este modelo se tomó el método de calibración. Este método  
8 consiste en obtener la tasa de crecimiento a través del crecimiento de las demandas presentada en  
9 los datos en dos tiempos diferentes.

10 En la misma línea, un ejemplo de estimación intermedio es el desarrollado para los países  
11 bajos donde se calculó la demanda de los usos del suelo basado en las dinámicas regionales. Esto  
12 anterior, a través de la inclusión de demandas de actividad en la regiones, es decir, se incluyeron  
13 variables como potencial de migración de actividades, niveles de actividad, población, empleos y  
14 densidad de dicha actividad en cada una de las regiones (White & Engelen, 2000). Ahora bien,  
15 una vez se utilizaban estas variables para hacer un cálculo lo que en verdad se obtenía era la  
16 demanda de actividad de las regiones que debían ser transformadas en área de suelo demanda para  
17 cada una. Esta transformación se daba a través de funciones de productividad que daban como  
18 resultado la necesidad de espacio en celdas para cada actividad en cada una de las regiones (White  
19 & Engelen, 2000). De este ejemplo de estimación se tomó el hecho de inclusión de variables como  
20 población y empleos que determina las dinámicas del comportamiento de la demanda en ciertos  
21 usos como el comercial e industrial.

22 Por último dentro de los modelos de Autómata Celular, es importante resaltar el modelo  
23 desarrollado en Orange County, FL. Esta simulación fue una integración entre modelación de  
24 transporte y usos del suelo, de manera que, cada componente brindaba información al otro con el  
25 ánimo retroalimentar en información útil para el desarrollo del modelo (Zhao & Peng, 2012).  
26 Basándose en la teoría de la renta ofertada y en el supuesto de que el mercado de suelo se comporta  
27 como una subasta (Martinez, 2000), se desarrolló la proyección de la ocupación del suelo teniendo  
28 en cuenta principalmente dos agentes, los de empleo y los de hogares. Los primeros ubicarían los  
29 usos comerciales e industriales mientras que los segundos solo actuarían con el uso residencial  
30 (Zhao & Peng, 2012). Es importante resaltar la inclusión de los modelos de transporte para  
31 determinar las dinámicas de demanda de los usos del suelo, puesto que una depende de la otra dada  
32 la separación espacial de actividades en las ciudades (Wegener & Furst, 1999).

33 Adicionalmente, cada uno de estos agentes se ve influenciado por modelos logit de  
34 movilidad y de localización. En el primero, se toma la decisión si se mantiene o se mueve de la  
35 ubicación actual y en el segundo dada la decisión de movimiento de cada celda se calcula la  
36 probabilidad de ocupar otra celda teniendo en cuenta la teoría de renta ofertada, esta última basada  
37 en funciones de voluntad de pago (Zhao & Peng, 2012). Este ejemplo previamente explicado  
38 muestra cómo el requerimiento de área para cada uno de los usos puede ser determinado con base  
39 a variables espaciales, de transporte y económicas a diferencia de las proyecciones utilizadas en  
40 otros modelos de AC.

41 Por otro lado, a diferencia de las proyecciones de demanda en los modelos AC diferentes  
42 investigaciones se ha realizado con base a modelos econométricos que representen las dinámicas  
43 del mercado en los diferentes usos. Estos van desde una proyección basada en el cambio de  
44 indicadores macroeconómicos hasta proyecciones utilizando modelos Input-Output y de  
45 interacción espacial gravitacionales. Por ejemplo, un modelo de estimación fue desarrollado para  
46 Hong Kong basado en indicadores macroeconómicos como tasas de desempleo, índices de

1 pobreza, Producto Interno Bruto junto con otras más locales como número de viviendas nuevas,  
2 oferta de viviendas, entre otras (Thomas, Skitmore, & Wong, 2008). Después de la escogencia de  
3 las variables se proceden a estimar los parámetros asociados con cada una de las variables a través  
4 de un análisis de regresión lineal similar a las formas de proyección explicadas previamente para  
5 los modelos de AC. De éste modelo para Hong Kong se tomó la metodología de regresión lineal  
6 para estimar las demandas.

7 Otro ejemplo es de Seúl, en el cual se realizó una estimación de demanda regional con base  
8 a un modelo Input-Output, de manera que se proyectó teniendo en cuenta relaciones de producción  
9 interespaciales e interindustriales, renta y consumo entre las diferentes áreas; para lo anterior fue  
10 necesario tener información de los flujos de personas, materias primas y servicios entre las  
11 regiones analizadas (Myung-Jin, 2005). La estimación parte de que el uso residencial se deriva de  
12 la población y los usos no residenciales se basa en la localización de los empleos (Myung-Jin,  
13 2005). De manera que, es una estimación más específica puesto que se adentra por cada una de las  
14 zonas a parámetros muy detallados. En el caso del uso del suelo residencial toma el tamaño de  
15 viviendas y de acuerdo a la población futura proyecta el área futura de dicho uso, en el caso de uso  
16 no residencial toma los empleos por zonas que se basan en las relaciones comerciales mencionadas  
17 previamente y los computa para generar un cálculo del área requerida en el uso no residencial  
18 (Myung-Jin, 2005). Este modelo es una aproximación mucho más detallado desde el punto de vista  
19 económico, sin embargo para el caso de Bogotá no era posible desarrollado por la poca  
20 información en cuanto a matrices insumo-producto y flujo de materias primas entre las regiones.

## 21 **METODOLOGÍA**

22 Con base en el análisis de los diferentes modelos desarrollados en otras investigaciones  
23 alrededor del mundo, se pueden tomar aspectos relevantes e importantes para la construcción de  
24 un modelo de estimación de la demanda de usos de suelo residencial, comercial e industrial para  
25 el modelo de Automata Celular en Bogotá y los municipios de sabana occidente (Funza, Mosquera,  
26 Madrid, Facatativá, Soacha y Cota). Como se mencionó previamente, hay aspectos de cada una de  
27 las estimaciones presentadas que son importantes incluir en el modelo a desarrollar. Por un lado  
28 es importante tener en cuenta las variables macroeconómicas utilizadas generalmente para las  
29 estimaciones de simulaciones AC, pero, se puede establecer que muchas de las estimaciones no  
30 incluyen el efecto sobre la demanda en la demanda del uso del suelo.

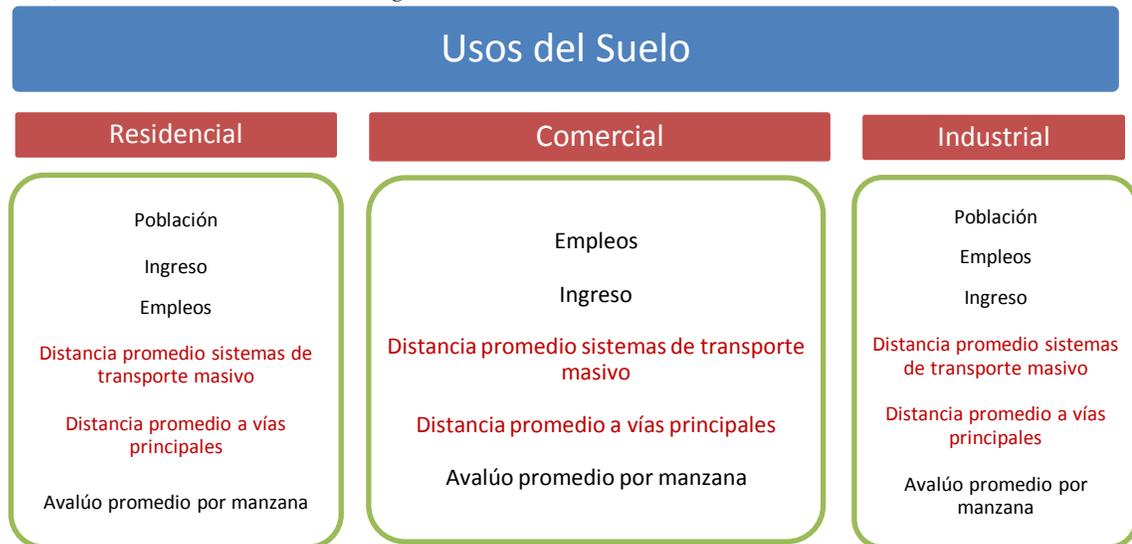
31 Es por esto, que el modelo desarrollado integra la demanda de usos de suelo derivada de  
32 los nuevos proyectos de infraestructura junto con variables económicas y espaciales. Este modelo  
33 se desarrolló en dos etapas para cada uso: un análisis de regresión con el método de mínimos  
34 cuadrados ordinarios y una regresión espacial Geográficamente Ponderada (GWR en inglés).  
35 Posteriormente, se validó con datos en diferentes tiempos para verificar el poder predictivo de los  
36 modelos en cada uno de los usos y poder realizar la proyección de la demanda de cada uno de los  
37 usos modelados en el 2040.

38 Para generar este modelo de estimación de la demanda se optó por realizar un análisis de  
39 regresión lineal, debido a que es de los métodos principales estadísticos de estimación de la  
40 demanda (Hanke, 1989). Por ende, se plantea la siguiente ecuación para el modelo:

$$41 \quad Y = \beta_0 + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2 + \dots + \beta_n * X_n \quad (2)$$

42 Donde la variable dependiente  $Y$  representa la demanda de celdas de uso de suelo en el área  
43 de estudio,  $X_1, X_2, \dots, X_n$  son las variables explicativas para cada uno de los usos que se muestran  
44 en los siguientes numerales y  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$  son los coeficientes de cada una de las variables que  
45 van a ser estimados. Para la estimación de estos parámetros se realizara un análisis a nivel de UPZ

1 en la ciudad de Bogotá junto con los municipios de la sabana Occidente: Cota, Funza, Mosquera,  
 2 Madrid, Facatativá y Soacha. Esta etapa se realizó con datos del año 2005, en el cual fue posible  
 3 determinar las variables significativas de cada uno de los modelos de demanda de los usos del  
 4 suelo. Las anteriores variables se incluyeron de tal forma que abarcaran temas de indicadores  
 5 macroeconómicos y relaciones espaciales con respecto a transporte público masivo y a vías  
 6 principales, estas se muestran en la *Figura 3*.



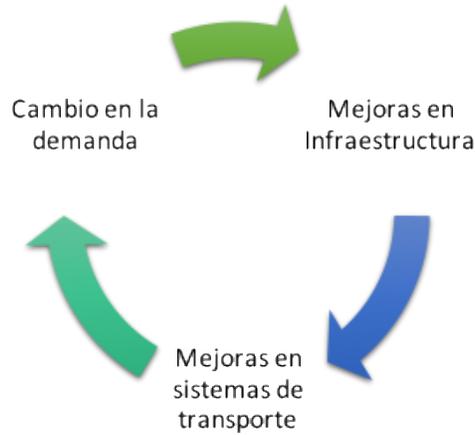
7  
 8 *Figura 3. Variables Modeladas para cada uno de los usos del suelo*

9 Posteriormente se utilizó la herramienta de regresión espacial como un método  
 10 complementario al modelo de Mínimos Cuadrados Ordinarios. Básicamente la GWR busca indicar  
 11 la no estacionalidad de las variables explicativas de una regresión (Bivand, 2008), es decir, asume  
 12 que hay variables que explican las regresiones dependiendo de la distancia. Por ejemplo, en ciertos  
 13 espacios la variable puede llegar a ser más explicativa en el modelo que en otros lugares, donde el  
 14  $R^2$  varía de acuerdo a la distancia (Ortiz Bernal & Paez Barajas, 2015).

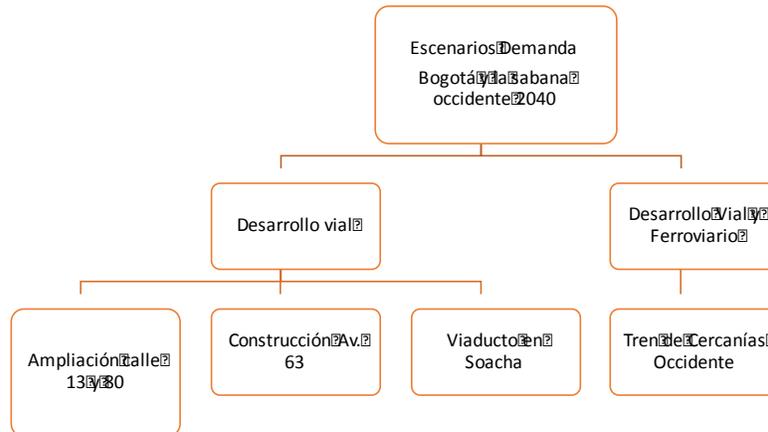
15 Por tal razón, el modelo de regresión podría mejorar en términos de ajuste, puesto que,  
 16 asume una ecuación por cada una de las UPZ y tiene en cuenta un vecindario determinado por un  
 17 método adaptativo (ESRI, 2016). De manera que, donde la distribución de UPZ es densa, el  
 18 vecindario es más pequeño; donde la distribución de entidades de UPZ es dispersa, el contexto  
 19 espacial es más amplio. Lo anterior, es especialmente útil en las UPZ y municipios en las periferias  
 20 del área de modelación.

21 Por otro lado, una vez se tenían los modelos en su mejor versión, es decir, con variables  
 22 significativas, mejor ajuste y mejor poder predictivo se buscó evaluar el impacto de los proyectos  
 23 de infraestructura de transporte en la demanda teniendo en cuenta un ciclo como el de la Figura 4,  
 24 esto implica que cada mejora en infraestructura o en mejora en los sistemas de transporte público  
 25 masivos influencia la accesibilidad (Bocarejo, Escobar, Oviedo Hernandez, & Garlaza, 2014) y  
 26 a su vez se genera un cambio en la demanda de cada uno de los usos del suelo, igualmente  
 27 influencia su localización. Es por esto que se plantean dos escenarios como se puede observar en  
 28 la Figura 5, uno basado en el desarrollo vial de la región de análisis con mejoras en infraestructura  
 29 vial, otro basado en el desarrollo ferroviario con la construcción del tren de cercanías entre Bogotá  
 30 y los municipios de la sabana occidente, el cual es un sistema LRT (Light Rail Transit)  
 31 adicionalmente el ultimo incluirá el desarrollo vial del primer escenario. La mayoría de proyectos  
 32 de infraestructura de transporte fueron escogidos con las propuestas de Asociación Publico Privada  
 33 (APP) de iniciativa privada, presentados al Gobierno Distrital. Sin embargo, el desarrollo

1 ferroviario no se contempla en este plan, pero el proyecto incluido se encuentra en su fase de  
 2 factibilidad y cuenta con el aval de la Gobernación de Cundinamarca y la Agencia Nacional de  
 3 Infraestructura (ANI).



4  
 5 *Figura 4. Interacción Demanda-Transporte*



6  
 7 *Figura 5. Esquema Escenarios de demanda*

8 Adicionalmente, durante el horizonte de tiempo se han planteado mejoras en  
 9 infraestructura de transporte que aplicarán en todos los escenarios durante años diferentes, estos  
 10 porque son proyectos que se esperan que sean una realidad con base a lo planteado en el Plan de  
 11 Desarrollo “Bogotá Mejor para Todos” y se resumen en la Figura 6.



12  
 13 *Figura 6. Cambios en infraestructura en el horizonte de tiempo.*  
 14

## 1 RESULTADOS

2 Como se expuso previamente la metodología desarrollada para obtener el modelo de  
3 demanda dependiendo de cada uno de los usos mencionados se realizó en dos etapas. En primer  
4 lugar, se obtuvo un modelo por el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO), el cual tuvo  
5 una verificación de significancia local de las variables del modelo y posteriormente una prueba de  
6 significancia global del modelo. Una vez se realizada esta etapa se procedía a ejecutar el modelo  
7 en el método de regresión espacial GWR, con el cual se esperaba obtener una ecuación por cada  
8 una de las UPZ y que la regresión en términos de ajuste de datos mejorara.

9 Posteriormente, era necesario evaluar el poder predictivo del modelo. Esto se llevó a cabo  
10 mediante la prueba a través del estadístico GEH, que se describe mediante la siguiente ecuación:

$$11 \quad GEH = \sqrt{\frac{2 * (x_2 - x_1)^2}{(x_2 + x_1)}} \quad (3)$$

12 Donde  $x_2$  serían los datos modelados en el año de validación y  $x_1$  los datos reales en el año  
13 de validación (2014). Este estadístico se utiliza generalmente en los modelos de transporte para  
14 validar la información puesto que representa la bondad de ajuste del modelo y tiene en cuenta la  
15 diferencia absoluta y la diferencia porcentual en los datos comparados (Feldman, 2012).

16 Por otro lado, dada la naturaleza de las variables a utilizar como variables dependientes de  
17 los modelos era necesario obtener datos confiables que aseguraran que los modelos no tendrían  
18 ningún sesgo en cuanto a la calidad de la información. Por tal motivo, la fuente de los datos se  
19 presenta en la siguiente tabla:

Variable	Nivel de Detalle	Fuente
Usos del Suelo (Bogotá)	Predial	Secretaría Distrital de Planeación
Usos del Suelo (Bogotá)	Celdas 100x100m	Imágenes Satelitales
División Administrativa	Barrios & Manzanas	Secretaría Distrital de Planeación & Secretaría de Planeación de Cundinamarca
Población	UPZ & Municipios	Secretaría Distrital de Planeación & DANE
Avalúo	Manzana	Catastro Distrital
Ingreso	Localidad	Secretaría Distrital de Planeación
Empleos	UPZ	Steer Davies Gleave
Vías Principales	Bogotá y Municipios Aledaños	Secretaría Distrital de Planeación
Sistemas de Transporte Público Masivos	Bogotá	Secretaría Distrital de Planeación

20 *Tabla 1. Resumen de fuentes y niveles de precisión de los datos utilizados*

21 Adicionalmente fue necesario filtrar estos datos recopilados para evitar sesgos en los  
22 modelos, es por esto que se retiró dentro de la estimación de los modelos las UPZ del Aeropuerto  
23 y de San Isidro-Patios, los cuales actuaban como valores atípicos por su naturaleza. En cuanto al  
24 procesamiento de los demás datos, se realizó a través del software ArcGIS que permitió manejar  
25 las bases de datos obtenidas, así como los demás análisis espaciales necesarios. Estos últimos  
26 fueron especialmente necesarios en determinar la distancia promedio del centroide de cada una de  
27 las manzanas a las vías principales y a los sistemas de transporte público masivo, en el caso de los  
28 municipios se utilizaron los barrios, provistos por la Secretaria de Planeación del Departamento.

1 *Uso Residencial*

2 Para obtener un modelo que tuviese un poder predictivo aceptable, se realizó un filtro de  
 3 los datos recopilados y se empezó a generar un modelo con diversas variables. Sin embargo, por  
 4 razones de significancia de las mismas fue necesario incluirlas a nivel de interacciones con otras  
 5 variables que promovieran significancia en el modelo. De manera que, una vez establecidas estas  
 6 condiciones se procedió a ejecutar la primera etapa del modelo residencial, la regresión lineal de  
 7 Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO). Éste se constituyó como un método de validación de las  
 8 variables, por lo que se obtuvo que el ajuste del modelo es bueno al ser del 58% en el  $R^2$  ajustado,  
 9 las variables son significativas en su mayoría y sus signos son coherentes al comportamiento de  
 10 los datos.

Resultados	
Variable	Elasticidad
POB_2005	0.1558
AVALUO	0.0435
INGRESO	0.0433
EMPLEOS	0.0249
CELD_TOT	0.1517
AVALUO_VIA	0.0262
AVALUO_TPM	0.0182

11 *Tabla 2. Elasticidades de las variables del modelo residencial*

12 Adicionalmente como el modelo posee un número de variables significativas, todas en  
 13 diferentes términos de unidades y magnitudes era necesario establecer cuáles eran más  
 14 representativas dentro del modelo, por lo cual se procedió a obtener las elasticidades de cada una  
 15 de las variables. Todas mostraron ser inelásticas con respecto a la variable dependiente, aunque  
 16 dos variables generaran mayor cambio en la variable dependiente, población y celdas totales por  
 17 UPZ. Es decir, un cambio porcentual pequeño en estas variables independientes tendría mayor  
 18 efecto sobre el uso del suelo en cada una de las UPZ.

19 Una vez obtenido este modelo con indicadores apropiados, se procedió a realizar la  
 20 segunda etapa del modelo de demanda de uso de suelo residencial, a través de una regresión  
 21 geográficamente ponderada (GWR), la cual se explicó previamente. En la *Figura 7* se puede  
 22 observar gráficamente que los errores estándar de los residuales se encuentran distribuidos  
 23 aleatoriamente el espacio, entre más aleatorios los errores se presenten el modelo será mejor (ESRI,  
 24 2016)..

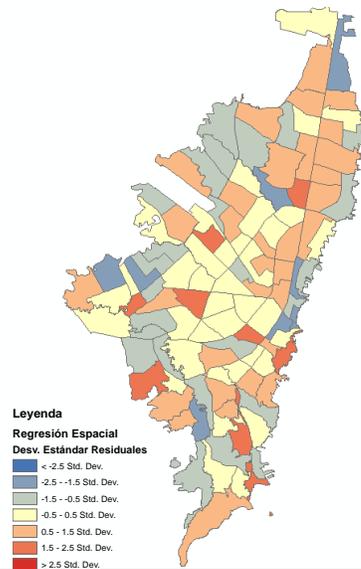


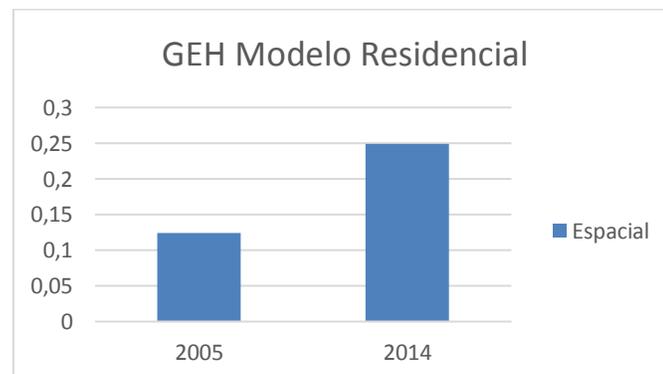
Figura 7. Regresión Espacial Residencial

Resultados Regresión Espacial	
# de Vecinos	58
R2	0.798214
R2Adjusted	0.720672

Tabla 3. Resumen resultados regresión espacial residencial

Por otro lado, la Tabla 3 muestra consideraciones que deben ser tenidas en cuenta a la hora de analizar una regresión GWR, en primer lugar, se debe mirar el ajuste del modelo con el  $R^2$ , seguido a esto el número de vecinos que se utilizaron para realizar las regresiones. En el modelo se muestra que la regresión de mínimos cuadrados es mejorada en 14 puntos porcentuales en cuanto al  $R^2$  ajustado

Con el objetivo de medir el poder predictivo del modelo se realizó una validación del modelo con los datos de otro año en el cual se tuvieran datos, en este caso se realizó con el año 2014. A través del estadístico GEH explicado previamente se hallaron para el modelo de MCO y el espacial. En teoría un GEH menor que 5 es apropiado (Feldman, 2012), en los modelos ambos cumplían ambos este requerimiento por lo que se podía establecer que el poder predictivo era bueno en ambos modelos. Se escogió mantener el modelo espacial debido a que brindaba un mejor ajuste en los datos.



Gráfica 1. Validación Modelo Residencial - Estadístico GEH

1  
2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

1 *Uso Comercial*

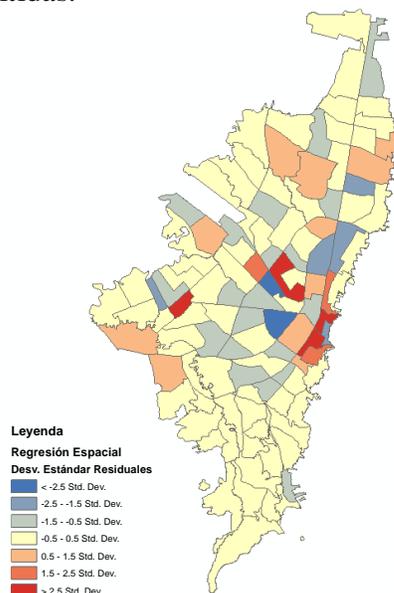
2 En el caso del uso de suelo comercial se aplicó la misma metodología que con el modelo  
 3 de uso de suelo residencial, en el que se ejecutó una regresión lineal de Mínimos Cuadrados  
 4 Ordinarios, en el que se obtuvieron unos resultados en los cuales las variables son significativas y  
 5 no presentan colinealidad. Adicionalmente, se presenta un ajuste de más del 50% de los datos. El  
 6 modelo presenta significancia global a través del estadístico F.

Resultados	
Variable	Elasticidad
AVALUO	0.0229
INGRESO	0.0192
EMPLEOS	0.0434
CELD_TOT	0.0285
INGRESO_TPM	0.0186
EMPLEOS_TPM	0.0232
AVALUO_VIA	0.0053

7 *Tabla 4. Elasticidades de las variables del modelo comercial*

8 Igualmente, fue necesario establecer cuáles eran las variables que más aportaban al modelo,  
 9 básicamente era necesario saber qué variables al presentar cambios influenciaban más en  
 10 determinar la demanda de uso del suelo comercial, las cuales se muestran a través de las  
 11 elasticidades descritas en la Tabla 4. Estas elasticidades muestran que en este modelo las variables  
 12 que más generan cambio son las de Empleos y Celdas Totales, puesto que requieren menores  
 13 cambios porcentuales en sus valores para generar un cambio de 1 punto porcentual en el uso  
 14 comercial.

15 Posteriormente y dada la situación presentada previamente se procedió a ejecutar la  
 16 segunda etapa, en la cual se obtuvo un modelo de regresión geográficamente ponderada (GWR).  
 17 Los siguientes mapas indican que en la regresión espacial los errores se distribuyen de manera  
 18 aleatoria y no presentan aglomeraciones de UPZ con valores extremos de desviación estándar lo  
 19 que sugiere que no hay variables omitidas.



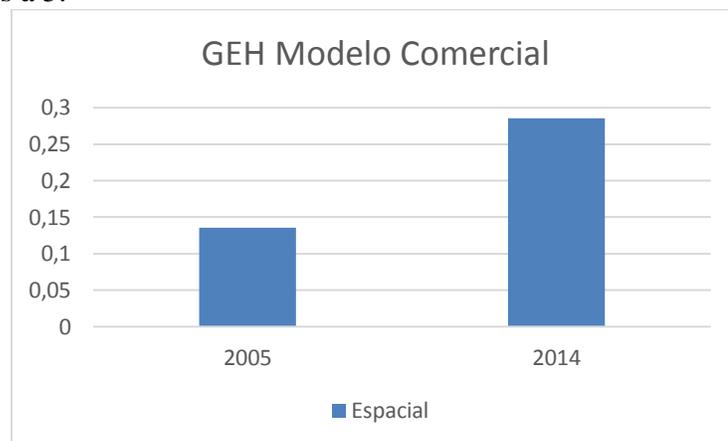
20 *Figura 8. Regresión Espacial del Uso Comercial*

Resultados Regresión Espacial	
# de Vecinos	84
R <sup>2</sup>	0.697826
R <sup>2</sup> Adjusted	0.626734

Tabla 5. Resumen resultados regresión espacial comercial

De igual manera, en la regresión espacial la Tabla 5 muestra las consideraciones a analizar en una regresión GWR. En primer lugar se debe mirar el ajuste del modelo con el R<sup>2</sup>, en este caso mejora 6 puntos porcentuales. Adicionalmente, el número de vecinos utilizado para la regresión fueron de 84 UPZ, que en comparación con el modelo residencial fue mayor.

Después de obtener estas comparaciones fue necesario evaluar el poder predictivo del modelo espacial para obtener las demandas en el 2040 del uso de suelo comercial. Esto se realizó a través del estadístico GEH, en la Gráfica 2 se puede apreciar que el método de regresión espacial obtiene valores menores a 5.



Gráfica 2. Validación Modelo Comercial - Estadístico GEH

### Uso Industrial

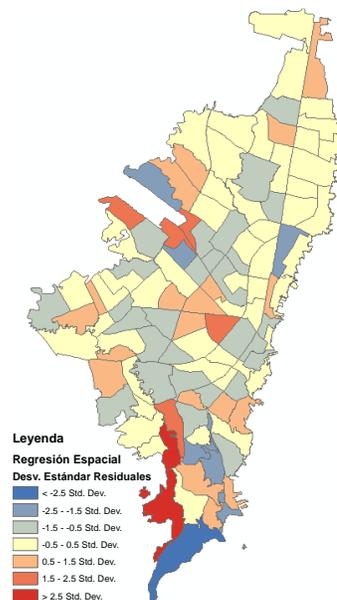
En el caso del uso de suelo industrial se realizó el mismo procedimiento efectuado con los dos modelos presentados previamente, en la primera etapa se ejecutó una regresión lineal de Mínimos Cuadrados Ordinarios, en el cual, las variables son significativas y no presentan colinealidad. De igual manera el modelo presenta significancia global, pero, el R<sup>2</sup> ajustado era bajo porque solo se representa el 30% de los datos en la regresión.

Resultados	
Variable	Elasticidad
POB_2005	0.1183
DIST_TM	0.0993
EMPLEOS	0.0411
CELD_TOT	0.1064
INGRESO_DI	0.0425
EMPLEOS_TM	0.0901
AVALUO_VIA	0.0070
LOGING	0.0760

Tabla 6. Elasticidades de las variables del modelo industrial

1 En cuanto al último paso dentro de esta etapa era necesario establecer cuáles eran las  
 2 variables que más aportaban al modelo. Al igual que los modelos anteriores se obtuvo esta  
 3 información a través de las elasticidades resumidas en la Tabla 6. En éstas, las variables de  
 4 Población y Celdas Totales se constituían como las que más influenciaban la variable dependiente,  
 5 puesto que, requieren menores cambios porcentuales en sus valores para generar un cambio de 1  
 6 punto porcentual en el uso industrial.

7 Posteriormente, se procedió a ejecutar la segunda etapa en la cual se obtuvo un modelo de  
 8 regresión geográficamente ponderado (GWR). El siguiente mapa indica que en el modelo de  
 9 regresión espacial los errores se distribuyen de manera aleatoria y no se presentan aglomeraciones  
 10 de UPZ con valores extremos de desviación estándar lo que sugiere que no hay variables omitidas.  
 11 Sin embargo, en este modelo se presentan contrastes de valores extremos en UPZ que limitan. Esto  
 12 se presenta hacia el sur de la ciudad lo cual se puede observar a través del mapa en la Figura 9. Lo  
 13 anterior implica que el modelo industrial puede que no genere las estimaciones mejor que un  
 14 modelo tendencial.



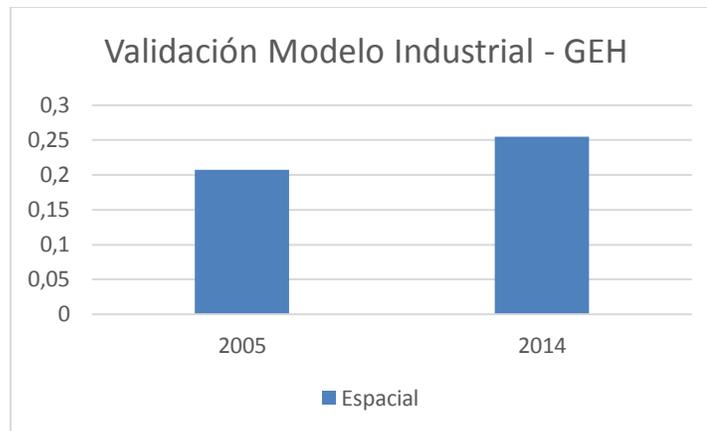
15  
 16 *Figura 9. Regresión Espacial del Uso Industrial*

Resultados Regresión Espacial	
# de Vecinos	58
R2	0.68417
R2Adjusted	0.522403

17 *Tabla 7. Resumen resultados regresión espacial industrial*

18 De igual manera, en la regresión espacial la Tabla 7 muestra las consideraciones a analizar  
 19 en una regresión GWR. En primer lugar se debe mirar el ajuste del modelo con el  $R^2$ , en este caso  
 20 mejora 20 puntos porcentuales con respecto al modelo de MCO. Adicionalmente, el número de  
 21 vecinos utilizado para la regresión fueron de 58 UPZ, que en comparación con el modelo de uso  
 22 de suelo comercial es menor y con el de uso residencial es igual.

23 Por último, fue necesario evaluar el poder predictivo para obtener las demandas en el 2040  
 24 del uso de suelo industrial. Para esto se ejecutó la validación con datos del 2014 y se realizó la  
 25 comparación a través del estadístico GEH. En la gráfica Gráfica 3 se puede apreciar que ambos  
 26 modelos se obtienen valores menores a 5.

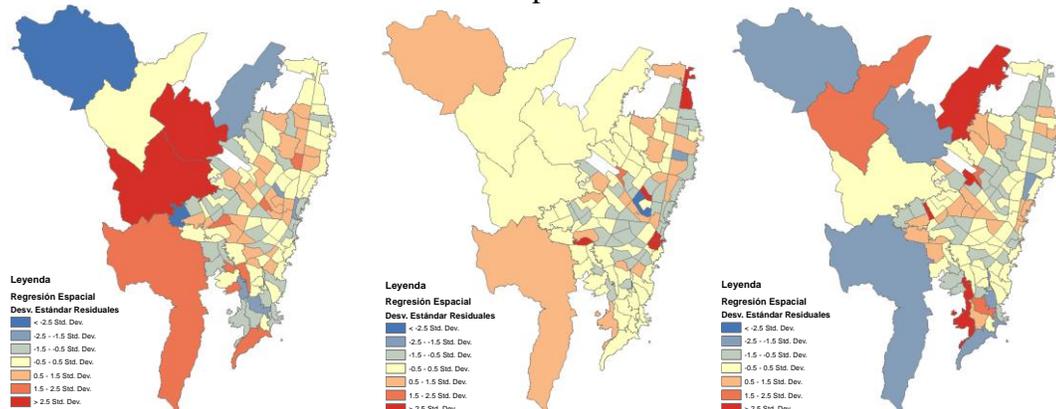


Gráfica 3. Validación Modelo Industrial - Estadístico GEH

1  
2

### 3 Municipios de la Sabana

4 Para los municipios de la sabana fue necesario ejecutar cada uno de los modelos espaciales  
5 presentados previamente., dado que ya se había obtenido una aproximación con respecto al mejor  
6 modelo para cada uno a través de la metodología explicada previamente. Adicionalmente, debido  
7 a la poca disponibilidad de datos sobre los municipios de Mosquera, Funza, Madrid, Facatativá,  
8 Soacha y Cota fue necesario ejecutar los modelos con datos del 2014, para este año se tenían datos  
9 para todas las variables estimadas en los modelos presentados anteriormente.



10

11 *Figura 10. Modelos Espaciales Municipios de la Sabana. Residencial (Izquierda),*  
12 *Comercial (Centro) e Industrial (Derecha)*

13 Los mapas presentados en la Figura 10 muestran los resultados de las regresiones  
14 espaciales realizadas para los usos del suelo con los municipios de la sabana incluidos, en el que  
15 los municipios son asumidos como una UPZ. En los modelos residencial e industrial se muestran  
16 los contrastes que se esperarían en las regresiones espaciales donde los errores están distribuidos  
17 aleatoriamente. Adicionalmente, ninguno de los tres presentó aglomeraciones de valores extremos  
18 lo que demuestra que no hay variables faltantes dentro de los modelos.

19 Es importante aclarar que, dado que las regresiones para los modelos de los municipios de  
20 la sabana se llevaron a cabo con los datos del 2014, no fue posible validar su poder predictivo. Sin  
21 embargo, debido a que las variables utilizadas fueron las mismas ejecutadas para los modelos con  
22 los datos de 2005 se espera que el poder predictivo no disminuya de manera drástica con respecto  
23 a los modelos de 2005.

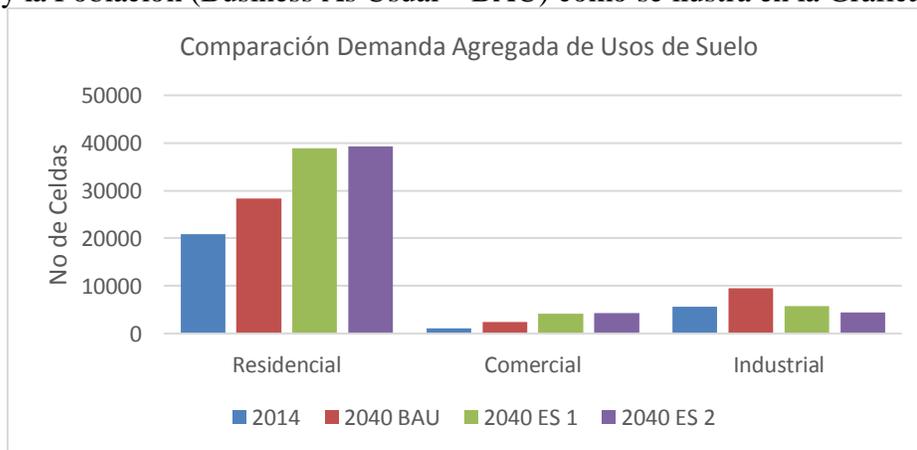
## 1 Demandas estimadas y sus escenarios

2 Una vez se obtenidas los modelos para cada uno de los usos de suelo modelados, era  
 3 necesario obtener las demandas en el año 2040, las cuales servirán como parámetro de entrada en  
 4 el modelo de usos del suelo de Bogotá y los Municipios de la Sabana Occidente. Para obtener estas  
 5 se debió obtener los valores de las variables independientes en el año 2040 para cada una de las  
 6 UPZ o municipios, para esto se utilizó análisis espacial o proyecciones como muestran la Tabla 8.

Variable	Valor 2040
<b>Población</b>	Proyecciones DANE y Tendenciales de Datos 2005-2014
<b>Avalúo</b>	Proyecciones tendenciales 2011 -2040
<b>Ingreso</b>	Proyecciones con Crecimiento PIB
<b>Empleos</b>	Proyecciones con Crecimiento PIB
<b>Vías Principales</b>	Análisis Espacial según Escenarios
<b>Sistemas Masivos de Transporte Público</b>	Análisis Espacial según Escenarios

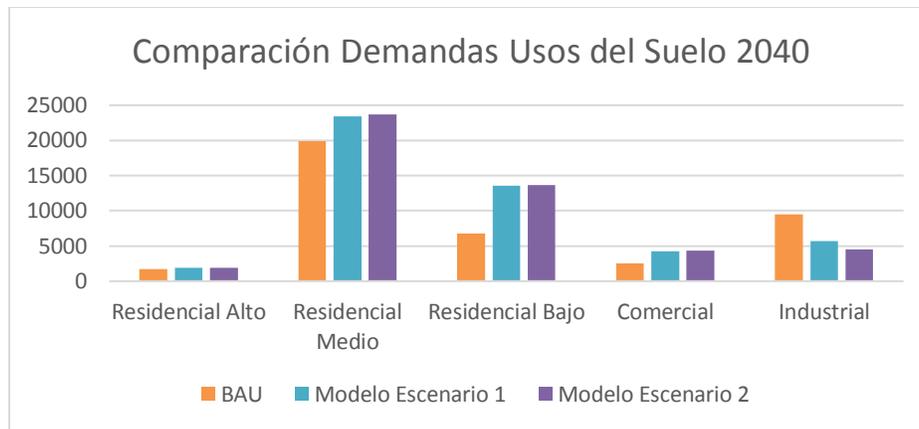
7 *Tabla 8. Proyecciones de variables al 2040*

8 De manera que, teniendo estos valores calculados para las variables independientes en cada  
 9 una de las UPZ y las regresiones para cada una de estas, se procedió a estimar la demanda de uso  
 10 de suelo por cada escenario y cada una de las UPZ y Municipios. Con estos valores es posible  
 11 comparar lo desarrollado en cada uno de los escenarios con un escenario tendencial con respecto  
 12 al PIB y la Población (Business As Usual – BAU) como se ilustra en la Gráfica 4.



13 *Gráfica 4. Demanda agregada usos del suelo*

14 Por lo anterior, es posible observar que un escenario tendencial subestima en gran medida  
 15 el uso del suelo residencial y en menor medida el comercial. Adicionalmente, sobreestima la  
 16 demanda en el uso de suelo industrial y se presenta un cambio en las demandas dependiendo el  
 17 escenario. Para los usos del suelo residencial y comercial se da una diferencia positiva entre los  
 18 escenarios de demanda debido a que las variables que involucran el acceso a Sistemas de  
 19 Transporte Público Masivo son positivas en ambos modelos. Por el contrario para el uso industrial  
 20 se reduce, puesto que esta misma variable afecta negativamente el modelo.  
 21



Gráfica 5. Demandas Usos del Suelo

1  
2  
3 Debido a que el modelo de usos del suelo del cual estos modelos serán insumo fue  
4 planteado con uso del suelo residencial dividido por ingresos, fue necesario dividir la demanda en  
5 estas categorías. Para esto, se asumió que el ingreso alto se daría en la ciudad y se mantendría en  
6 la proporción actual de 8% de las celdas residenciales, el ingreso medio se ampliaría hasta el 70%  
7 de las celdas residenciales y el ingreso bajo el 24% de las celdas residenciales de la ciudad. En  
8 cuanto a las celdas residenciales de los municipios se asumió que se mantendrían en la misma  
9 categoría que la presentada en los datos de 2005. Estos son ingreso bajo para los municipios de  
10 Funza, Soacha y Facatativá, mientras que ingreso medio para los demás.

## 11 CONCLUSIONES Y OPORTUNIDADES PARA MEJORAR

12 Los modelos de demanda desarrollados para los usos del suelo residencial, comercial e  
13 industrial pueden establecer las demandas de cada uno de los usos en términos de celdas de  
14 100x100metros para un año determinado, en este caso se utilizó el año 2040. Aunque fueron  
15 desarrollados para un modelo de Automata Celular con un área de modelación continua, sin  
16 divisiones, eventualmente si el modelo de AC requiere mayor precisión en el área de estudio las  
17 demandas pueden desagregarse hasta un nivel de UPZ. Estos modelos poseen dos limitaciones  
18 que se han mencionado previamente, la primera es que las regresiones de los municipios no  
19 pudieron ser validadas con datos de otro año, puesto que por disponibilidad de datos no fue posible  
20 correr los modelos de demanda desde el año 2005. Segundo, al desagregar la demanda con respecto  
21 a los ingresos, se realizó mediante la proporción derivada del comportamiento tendencial de los  
22 usos a través de los años con datos disponibles.

23 El mayor aporte de estos modelos de demandas es que generan mayor precisión frente a un  
24 escenario de desarrollo tendencial en el que simplemente se proyecta con variables  
25 macroeconómicas como población y crecimiento del PIB. Esto debido a que los modelos  
26 desarrollados incluyen dinámicas propias de cada uno de los usos representadas a través de las  
27 variables incluidas. Adicionalmente, la inclusión de las variables de transporte asegura que se  
28 tengan en cuenta los efectos propios de los sistemas de transporte sobre el desarrollo de los usos  
29 del suelo.

30 En comparación con un escenario tendencial, este modelo demuestra que el mencionado  
31 subestima los usos de suelo residencial y comercial, mientras que se sobreestima la demanda de  
32 uso de suelo industrial. Adicionalmente, contemplan el efecto del desarrollo de nuevos proyectos  
33 de infraestructura de transporte sobre las demandas. Lo anterior, en el sentido que un proyecto  
34 como una nueva troncal de Transmilenio (BRT) o el desarrollo del tren de cercanías (LRT) generan

1 mayor accesibilidad y se dan cambios positivos o negativos dependiendo de cada uno de los usos.  
2 Para los escenarios modelados para el año 2040 se establecieron dos escenarios con mejoras en  
3 infraestructura de transporte, el primero un desarrollo con base a mejoras en la infraestructura vial  
4 y el segundo con el mismo desarrollo vial que el primero más un desarrollo ferroviario a través del  
5 proyecto de LRT del tren de Cercanías entre Bogotá y los municipios de Sabana Occidente. Fue  
6 posible observar el efecto de incluir el LRT en el sentido que las demandas cambian entre los  
7 escenarios. En efecto el uso de suelo residencial tuvo mayor demanda al incluirlo mientras que el  
8 industrial decreció.

9       Adicionalmente, los modelos desarrollados demuestran que estas regresiones que implican  
10 datos espaciales se ajustan mejor y su poder predictivo es mejor a través de las regresiones GWR.  
11 En los usos residencial, comercial e industrial se mejoró su ajuste en 14, 6 y 20 puntos porcentuales  
12 respectivamente. Ahora bien, es necesario recalcar que para poder tener una regresión espacial  
13 confiable es necesario obtener primero una regresión lineal confiable por Mínimos Cuadrados, en  
14 la que todas las variables son significativas y aportan a la determinación de la demanda. En  
15 resumen, los modelos obtenidos para los usos residencial y comercial presentan buenos ajustes y  
16 buenos poderes predictivos, no obstante, el modelo industrial presenta contrastes de valores  
17 extremos en la desviación estándar de los residuales en UPZ que limitan y se ubica hacia el sur de  
18 la ciudad. Lo anterior implica que el modelo industrial puede que no genere las estimaciones mejor  
19 que un modelo tendencial, sin embargo es necesario desarrollar otras investigaciones para este uso  
20 y se pueda determinar que genera el cambio de cerca de 4400 celdas en promedio con los  
21 escenarios planteados. Igualmente una oportunidad para mejorar en este uso es incluir las  
22 restricciones que se generan a través de los planes de ordenamiento territorial, los cuales pueden  
23 llevar a romper o imponer dinámicas en la demanda y el comportamiento de este uso.

24       Por otro lado, la validación realizada con los datos del 2014 mostró que aunque en todos  
25 los usos el estadístico GEH aumentaba que sugería que se desmejoraba su poder predictivo, no fue  
26 peor que 5, valor en el que empieza a tener problemas. De manera que, el poder predictivo de los  
27 modelos es bueno.

28       Ahora bien, hay ciertos aspectos que se identificaron durante el desarrollo de estos modelos  
29 en los que hay oportunidad para mejorar. Básicamente además de la limitación del modelo  
30 industrial, se presentan las dos limitaciones mencionadas que se pueden mejorar con la validación  
31 de las regresiones de los municipios con los datos de años posteriores cuando se encuentren  
32 disponibles, e incluir una forma de dividir el ingreso para cumplir con el requerimiento del modelo  
33 general de los usos del suelo. Adicionalmente, otras oportunidades identificadas son las de  
34 inclusión de aspectos como la densidad en el uso del suelo residencial y la integración de tiempos  
35 de viaje a través de modelos de transporte de 4 pasos con variables que puedan identificar las  
36 dinámicas de los tiempos de viaje con la demanda de suelo. Lo último porque los mejoramientos  
37 en los tiempos de viaje pueden llegar generar demanda de usos de suelo como el residencial y sería  
38 más fácil medir el impacto de proyectos como el del tren de cercanías, en el que no se reducen las  
39 distancia que deben recorrer las personas, pero si los se reducen los tiempos de viaje  
40 significativamente.

## 41 REFERENCES

- 42       Myung-Jin, J. (2005). Forecasting urban land-use demand using a metropolitan input-  
43 output mode. *Environment and Planning A*, 1311-1328.  
44       CAF. (2011). *Desarrollo urbano y movilidad en América Latina*. Panamá: CAF.

- 1 Starkey, M. (1 de Marzo de 2013). Medellín Voted City of the Year. Recuperado el 19 de  
2 Noviembre de 2015, de Urban Land Institute: [http://uli.org/urban-land-magazine/medellin-](http://uli.org/urban-land-magazine/medellin-named-most-innovative-city/)  
3 [named-most-innovative-city/](http://uli.org/urban-land-magazine/medellin-named-most-innovative-city/)
- 4 Suzuki, H., Cevero, R., & Luchi, K. (2014). *Transformando las ciudades con el*  
5 *transporte público*. Washington DC: World Bank.
- 6 Zhao, L., & Peng, Z.-R. (2012). LandSys: an agent-based Cellular Automata model of  
7 land use change developed for transportation analysis. *Journal of Transport Geography*, 35-49
- 8 Waddella, P., Ulfarsson, G. F., Franklin, J. P., & Lobb, J. (2007). Incorporating land  
9 use in metropolitan transportation planning. *Transportation Research Part A*, 382-410.
- 10 Van Vliet, J., Hurkens, J., White, R., & van Delden, H. (2012). An activitybased celular  
11 automaton model to simulate land-use dynamics. *Environment and Planning B*, 198-212
- 12 Torrens, P. (2002). Cellular Automata and Multi-Agent Systems as Planning Support  
13 Tools. En S. Geertman, & J. Stillwell, *Planing support systems in practice* (págs. 205-222).  
14 London: Springer – Verlag
- 15 Mancosu, E., Gago-Silva, A., Barbosa, A., de Bono, A., Ivanov, E. L., & Fons, J. (2015).  
16 Future land-use change scenarios for the Black Sea catchment. *Enviromental Science & Policy*,  
17 26 – 36
- 18 Van Vliet, J., Naus, N., Van Lammeren, R. J., Bregt, A., Hurkens, J., & Van Delden, H.  
19 (2013). Measuring the neighbourhood effect to calibrate land use models. *Computers,*  
20 *Enviroment and Urban Systems* , 55-64
- 21 White, R., & Engelen, G. (1997). Cellular automata as the basis of integrated dynamic  
22 regional modeling. *Enviroment an Planning B: Planning and Design*, 235-246
- 23 White, R., & Engelen, G. (2000). High-Resolution integrated modelling of the spatial  
24 dynamics of urban and regional systems. *Computers, Environment and Urban Systems*, 383-400.
- 25 Sharifia, M., Karimib, M., & Mesgari, M. (2012). Modelling Land Allocation Process in  
26 Time and Sapce. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial*  
27 *Information Sciences*, 63-68
- 28 Martinez, F. (2000). Towards a Land Use and Transport Interaction Framework. En D. A.  
29 Hensher, & K. J. Button, *Handbook of Transport Modelling* (págs. 145-164). Oxford.
- 30 Wegener, M., & Furst, F. (1999). *Land-Use Transport Interaction: State of the Art* .  
31 Dortmund.
- 32 Thomas, S., Skitmore, M., & Wong, K. F. (2008). Using genetic algorithms and linear  
33 regresion analysisi for private housing demand forecast. *Building and Enviroment*, 1171-1184.
- 34 Myung-Jin, J. (2005). Forecasting urban land-use demand using a metropolitan input-  
35 output mode. *Environment and Planning A*, 1311-1328
- 36 Hanke, J. (1989). Forecasting in business schools: a follow-up survey. *International*  
37 *Journal of Forecasting*, 259-262.
- 38 Bivand, R. (2008). Geographically Weighted Regression. En R. Bivand, E. Pebesma, &  
39 V. Gomez-Rubio, *Applied Data Analysis with R* (págs. 305-308). New York: Springer-Verlag
- 40 Ortiz Bernal, M., & Paez Barajas, D. (2015). *Evaluation of the economic impact of fourth*  
41 *generation road concessions in the valorization of rural land in Colombia*. Washington D.C:  
42 World Bank Conference on land and poverty
- 43 ESRI. (2016). *Interpreting GWR results*. Recuperado el 19 de Julio de 2016, de ESRI:  
44 [http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-statistics-toolbox/interpreting-gwr-](http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-statistics-toolbox/interpreting-gwr-results.htm)  
45 [results.htm](http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-statistics-toolbox/interpreting-gwr-results.htm)

- 1           Bocarejo, J. P., Escobar , D., Oviedo Hernandez, D., & Garlaza, D. (2014). Accessibility  
2 Analysis of the Integrated Transit System of Bogotá. *International Journal of Sustainable*  
3 *Transportation*
- 4           Feldman, O. (2012). THE GEH MEASURE AND QUALITY OF THE HIGHWAY  
5 ASSIGNMENT MODELS. *Association for European Transport and Contributors*
- 6           ESRI. (2016). *Interpreting OLS results*. Recuperado el 19 de Julio de 2016, de ESRI:  
7 <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-statistics-toolbox/interpreting-ols->  
8 [results.htm](http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-statistics-toolbox/interpreting-ols-)
- 9  
10