

CALIBRACIÓN DE UN MODELO DE SIMULACIÓN DE DINÁMICAS DE OCUPACIÓN DEL SUELO. CASO DE ESTUDIO: BOGOTÁ Y LA REGIÓN

Luis Ángel Guzmán García

Director del Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional (SUR),
Universidad de los Andes, Colombia

la.guzman@uniandes.edu.co

Luis Alberto Rubio Caballero

Asistente del Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional (SUR)
Universidad de los Andes, Colombia

la.rubio1588@uniandes.edu.co

Javier Rodrigo Peña Bastidas

Asistente del Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional (SUR)
Universidad de los Andes, Colombia

jr.pena@uniandes.edu.co

RESUMEN

En los últimos años, los modelos de simulación de la ocupación territorial basados en autómatas celulares han ganado amplia aceptación por ser intuitivos, flexibles y principalmente porque permiten recrear características históricas de cambio y patrones propios de cada región. La aplicación de estas herramientas toma gran relevancia en el contexto de las ciudades latinoamericanas de rápido crecimiento, buscando probar con anticipación políticas enfocadas a controlar los efectos negativos del desarrollo urbano como son la congestión, la polución, los asentamientos en suelos de riesgo, entre otros.

Este estudio fue desarrollado por la Universidad de los Andes en convenio con la Secretaria Distrital de Planeación de Bogotá, mediante la utilización del software METRONAMICA (RIKS), que se alimenta de información básica de la ciudad de Bogotá y 17 municipios aledaños, para dar una visión futura del territorio a partir de escenarios seleccionados para el año 2030. En este modelo se utilizó una resolución de celda de 60X60 m y 14 usos de suelo diferentes.

Este documento presenta las diferentes etapas de creación del modelo: 1) la recolección de información sobre los usos del suelo, la zonificación ambiental, la aptitud del suelo y la accesibilidad al transporte; 2) la calibración de la herramienta mediante la inspección visual, las tablas de contingencia y la utilización de los indicadores Kappa y Fuzzy Kappa como métodos de validación; 3) la generación de escenarios con diferentes niveles de complejidad en términos de infraestructura transporte y planes de ordenamiento territorial. Finalmente, los resultados del proceso de calibración y los diferentes escenarios simulados son discutidos, indicando la validez del modelo como soporte a la estructuración de políticas de ordenamiento territorial.

Área temática: Transporte y uso del suelo

PALABRAS CLAVE: Autómata celular, Calibración, Usos del suelo

CALIBRATION OF A MODEL OF SIMULATION OF DYNAMICS OF OCCUPATION OF LAND USE. CASE STUDY: BOGOTÁ AND THE REGION

ABSTRACT

In recent years, simulation models of territorial occupation based on cellular automata have gained wide acceptance because they are intuitive, flexible and mainly because they allow the recreation of historical characteristics of change and patterns specific to each region. The application of these tools takes great relevance in the context of fast-growing Latin American cities, seeking to test in advance policies aimed at controlling the negative effects of urban development such as congestion, pollution, settlements on risky land uses, among others.

This study was developed by Los Andes University in agreement with the District Planning Office of Bogotá city, using METRONAMICA software (RIKS), which feeds on basic information of Bogotá city and 17 surrounding municipalities, to give a future vision of the territory from selected scenarios for the year 2030. In this model a resolution of 60X60 m cell was used and 14 different land uses.

This document presents the different stages of creation of the model. 1) the collection of information on land uses, environmental zoning, land use aptitude and transport accessibility; 2) the calibration of the tool through visual inspection, contingency tables and the use of the Kappa and Fuzzy Kappa indicators as validation methods; 3) the generation of scenarios with different levels of complexity in terms of transport infrastructure and territorial planning plans. Finally, the results of the calibration process and the different simulated scenarios are discussed, indicating the validity of the model as a support to the structuring of territorial ordering policies.

KEYWORDS: Cellular automata, Calibration, Land use

1. INTRODUCCIÓN

Alrededor del mundo las ciudades están creciendo a ritmos acelerados, actualmente 54% de la población vive en áreas urbanas y se espera que esta cifra siga en aumento (World Bank, 2018), un fenómeno que da relevancia al proceso de planificación de la ocupación territorial, buscando controlar con anticipación los efectos negativos del desarrollo urbano como son la congestión, la polución, los asentamientos en suelos de riesgo, entre otros. No obstante, la planificación de la expansión de una ciudad es un proceso altamente complejo, principalmente para las grandes ciudades capitales, a causa de las relaciones que se han evidenciado con sus municipios aledaños, en donde se crean focos de empleo, comercio, industria, recreación y vivienda. Por lo tanto, un modelo que brinde soporte a la evaluación de políticas de ordenamiento territorial para una ciudad capital deberá considerar también su área de influencia.

En este contexto la utilización de modelos computarizados de ocupación territorial es una práctica que ha ganado amplia aceptación al reproducir características históricas de cambio y patrones propios de la región (E. A. Silva & Clarke, 2002). Internacionalmente existen diversas herramientas que se valen de los avances en computación para simular de forma integral dichas interacciones, estos modelos tienen como objetivo explorar diferentes escenarios futuros, generalmente asociados a políticas de gobierno, para medir su impacto en los patrones de desarrollo urbano o rural (Veldkamp & Lambin, 2001).

Debido a que los programas de modelación disponibles en el mercado son genéricos, los parámetros que funcionan bien en un área geográfica, no se desempeñan con la misma calidad en otra locación (E. A. Silva & Clarke, 2002), esto implica un proceso de ajuste de parámetros para mejorar los resultados obtenidos, lo cual se ha denominado calibración; se considera entonces, que la calibración de un modelo está asociada directamente con el sitio de aplicación y debe tener en cuenta que existen diferentes comportamientos socioeconómicos únicos para representar cada asentamiento urbano.

Sin embargo, aún existe incertidumbre en la valoración y validez de los resultados obtenidos de los modelos de simulación, al considerar que los procesos de cambio en los usos del suelo están inherentemente ligados a las decisiones tomadas por humanos, las cuales difícilmente tienen un comportamiento determinístico (Brown et al 2005). Adicionalmente, los cambios son causados por la combinación de factores físicos y socioeconómicos que se influyen mutuamente, lo que implica que muchas probabilidades de ocurrencia de un evento o desarrollo de cierto tipo de uso estén sujetas a acontecimientos pasados de múltiples actores, en economía esto se conoce como “path dependance”, indicando que su evaluación no es un proceso fácil ni directo (Batty & Torrens, 2005; Torrens, 2011).

En este sentido, la estimación del nivel de concordancia entre dos mapas se ha realizado tradicionalmente con los indicadores Kappa y Fuzzy Kappa. El indicador Kappa se basa en una comparación directa de mapas celda por celda, los valores Kappa pueden variar entre -1 y 1, donde los valores positivos indican convergencia con un nivel mayor al que se puede esperar al comparar un mapa generado con parámetros totalmente aleatorios y un mapa real, por su parte los valores negativos muestran que un mapa totalmente aleatorio tendría mejor concordancia que la simulación del modelo. Este indicador se ha utilizado en diferentes estudios para medir el ajuste entre los resultados de la simulación y el mapa real al final del periodo de simulación (Foody, 2002; R. Gill Pontius, 2002).

Un punto negativo de utilizar este indicador en la evaluación de los resultados de los modelos es que, pequeños desplazamientos en la localización de un uso se clasifican como incorrectos, por ejemplo, una simulación de un área de uso de suelo residencial que se ubica sólo una celda lejos de la posición donde realmente se desarrolló esta nueva área residencial, podría ser tenida en cuenta desde el punto de vista del modelador como un resultado casi correcto; sin embargo, el indicador Kappa no lo reconoce como tal.

Para disminuir el impacto de esta característica del indicador Kappa se desarrolló el indicador Fuzzy Kappa (Hagen-Zanker et al., 2005; Hagen, 2003), el cual se basa en una evaluación de mapas celda por celda, y adiciona una comparación del conjunto de celdas en el vecindario para expresar la similitud con un valor entre 0 (completamente distinto) y 1 (completamente idéntico). Se considera que el uso principal del indicador Fuzzy Kappa está en la calibración de modelos de ocupación territorial con alta resolución (Hagen-Zanker, 2009).

2. METODOLOGIA

Para este estudio se aplicó el modelo basado en autómatas celulares utilizado en Metronamica (Delden & Hurkens, 2011), el cual se compone de un mosaico de celdas, donde el estado de cada celda representa un número limitado de usos del suelo. El cambio de estado en cada celda se calcula en pasos discretos siguiendo un set de reglas de transición. Las reglas de transición incluyen la “aptitud ambiental” que define el efecto de las características físicas del suelo para la generación de un uso futuro, estas contemplan por ejemplo la presencia de fenómenos de inundación o remoción de masas. La “zonificación” que representa las restricciones externas debidas a decisiones políticas, por ejemplo los Planes de Desarrollo Territorial; finalmente la “accesibilidad” que mide el efecto de la cercanía a los sistemas de transporte en el desarrollo de ciertas actividades y por ende de los usos de suelo (RIKS, 2012).

Una forma de representar la relación en un grupo de celdas aledañas es mediante las reglas de vecindad, las cuales se obtienen de las curvas de sobreestimación, estas últimas muestran la densidad de un uso de suelo en las cercanías a otro uso o a una infraestructura de transporte (Verburg et al., 2004) y basado en los resultados obtenidos se deduce los parámetros para Metronamica como distancias de decaimiento y peso relativo (Meijers, 2012; RIKS, 2012).

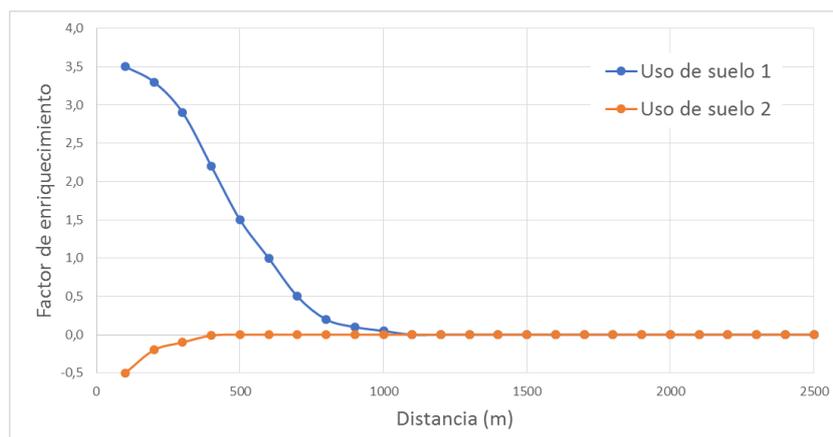


Figura 1 Ejemplo de las curvas de sobreestimación

Con la suma de las anteriores variables se calcula el “potencial de transición”, el cual indica que la probabilidad de cambio del uso de suelo en una locación está influenciada no solo por el uso actual, sino que también por los usos de suelo y las infraestructuras de transporte circundantes (Hagoort, Geertman, & Ottens, 2008), en otras palabras el desarrollo de un uso de suelo futuro está dado por los efectos de atracción / repulsión que ejercen los usos vecinos en un punto específico (van Vliet et al., 2013).

El modelo de Metronamica tiene tres clases de usos de suelo: los usos activos, se definen como aquellos a los cuales se les asigna una ubicación en la simulación dependiendo del potencial derivado de las reglas de transición. Los usos pasivos, estos solo cambian en la medida que se den cambios en los usos activos. Por último, la clase de usos de suelo fijo, se definen como aquellas clases que no están programadas para cambiar en el periodo de simulación.

Para cada momento en el tiempo, los usos de suelo activo son ubicados en los lugares con mayor potencial para su desarrollo. El potencial de cada celda está dado por la siguiente formulación:

$$P_{k,i} = r_{k,i} * A_{k,i} * S_{k,i} * Z_{k,i} * N_{k,i}$$

Donde, $P_{k,i}$ es el potencial para el desarrollo el uso de suelo k en la celda i , $r_{k,i}$ es un término de perturbación aleatoria, $A_{k,i}$ es la accesibilidad para el tipo de uso de suelo, $S_{k,i}$ es la aptitud física para el desarrollo de determinado uso de suelo y $N_{k,i}$ es la influencia de las reglas de vecindad. Una explicación detallada del modelo de Metronamica puede ser consultada en (RIKS, 2012).

El proceso de simulación con herramientas de autómatas celulares se divide en tres etapas, ver Figura 2, primero es necesario recolectar la información para una misma área geográfica en dos momentos diferentes en el tiempo, separados generalmente por periodos de varios años, a estos momentos se les denomina inicio y fin del periodo de calibración. Posteriormente, en la segunda etapa, es necesario calibrar el modelo estableciendo las reglas de vecindad (efectos de repulsión /atracción) entre los usos de suelo y los factores de accesibilidad, con el fin de lograr patrones de simulación similares a los que se presentaron en realidad (Aljoufie, et al 2013).

En la calibración el objetivo se centra en ajustar los parámetros del modelo para obtener un mapa simulado lo más similar posible al mapa real en el fin del periodo, partiendo siempre de la información en el inicio del periodo. Este es un proceso iterativo (ver Figura 2) en el cual se espera que cada vez que se haga una comparación de mapas en el año final las diferencias sean menores (C. De Silva, Wimaladasa, & Munasinghe, 2015).

La tercera etapa del proceso es la aplicación del modelo, que consiste en generar resultados futuros, en este caso ya no se tendrá información real con la cual comparar al final del periodo, por lo cual se confía en que los patrones modelados en el proceso de calibración se sigan presentando en la región. En este

paso se debe definir un año en el futuro hasta el cual se quiere correr el modelo y también diseñar un set de posibles escenarios, los cuales están dados por la introducción de nuevas infraestructuras de transporte, nuevas demandas ocupación de los usos de suelo y las políticas de ordenamiento territorial que se quieran probar.

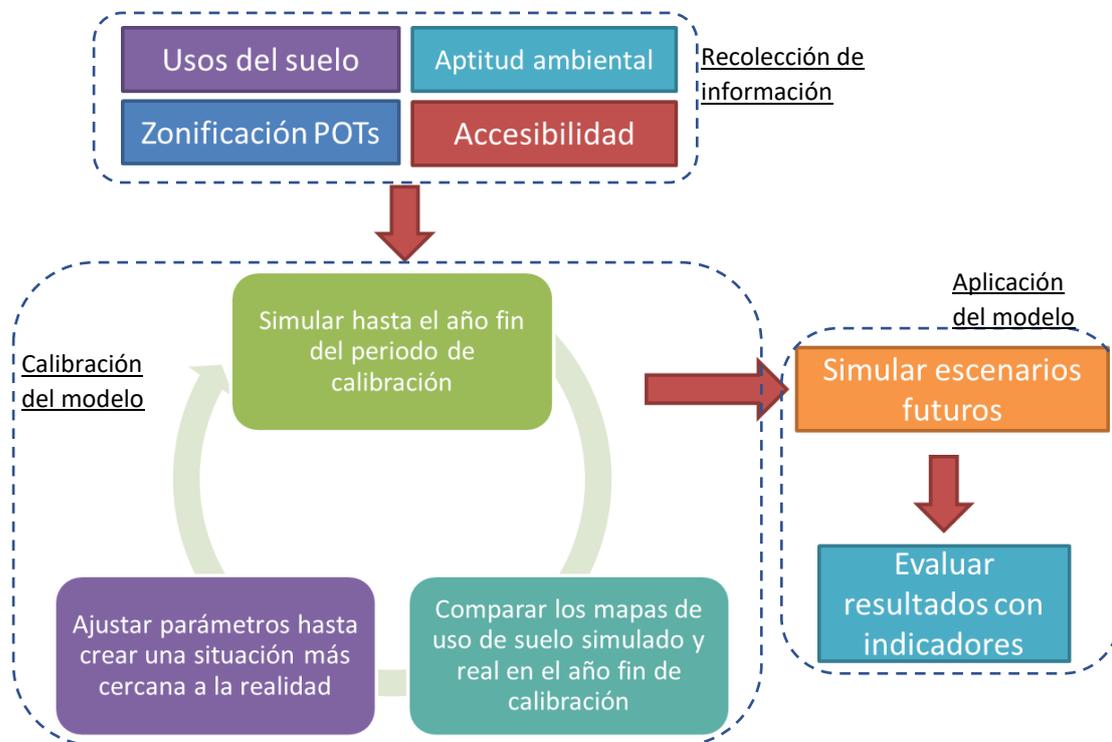


Figura 2 Descripción gráfica de aplicación del modelo Metronamica.

2.1 Simulación de la ocupación territorial en la ciudad de Bogotá

La Universidad de Los Andes en conjunto con la Secretaría Distrital de Planeación de Bogotá (SDP), desarrollaron un modelo de simulación territorial para Bogotá y 17 municipios aledaños: Zipaquirá, Gachancipá, Tabio, Tocancipá, Cajicá, Chía, Sopó, Tenjo, Cota, La Calera, Funza, Madrid, Mosquera, Facatativá, Bojacá, Soacha y Sibaté, que suman en total un área aproximada de 2.800 km². Entre ellos conforman una región metropolitana por sus interacciones funcionales, pero sin embargo no existe de manera formal un organismo gubernamental a este nivel, lo que históricamente ha llevado a un proceso de crecimiento desorganizado, donde la población aumenta de tamaño y entra en relación directa con el suelo, transformándolo para habitarlo por la cercanía a los centros de empleo, recreación y cultura (Guzman, Oviedo, & Bocarejo, 2017).

La especificación del tamaño de celda para todo el proyecto fue 60 x 60 m, adicionalmente se consideró, en el proceso de calibración, al año 2007 como base y el 2016 como año final. Por otra parte, se tomó el año 2030 como año de evaluación de los diferentes escenarios. Para cumplir estos requerimientos fue necesario explorar múltiples sets de datos, principalmente porque la información catastral completa para diferentes años solo se encontraba disponible para la ciudad de Bogotá, en aquellos municipios donde no se tenía información se recurrió al análisis de imágenes satelitales y digitalización de documentos oficiales.

Para incluir los parámetros de accesibilidad se tuvo que recopilar información geográfica adicional entre la que se encuentra la malla vial de la región, las estaciones de Transmilenio y la red de ciclorrutas en Bogotá, toda esta información fue tomada de diversas fuentes que incluyen la infraestructura de datos espaciales de Bogotá (IDECA), SDP y la Universidad de los Andes. En el caso de las capas de aptitud

ambiental se recurrió al Servicio Geológico Colombiano, el Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER) dónde se encontró información de los fenómenos de remoción de masa, incendios forestales e inundación, por último, para la zonificación se recurrió a la información de los Planes de Ordenamiento Territorial de los municipios a través del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y las correspondientes alcaldías.

La medida global de cambio en términos de número de celdas fue calculada por la Secretaría Distrital de Planeación y se ingresó al modelo como una restricción exógena. Los tipos de uso de suelo se clasificaron en 15 clases idénticas para cada año lo cual hizo posible la comparación. Las clases son: (0) Disponible, (1) Residencial estrato bajo, (2) Residencial estrato medio, (3) Residencial estrato alto, (4) Industrial, (5) Comercial, (6) Mixto, (7) Servicios, (8) Parques y clubes, (9) Cuerpos de agua, (10) Dotacional, (11) Pistas de aeropuertos, (12) Vías, (13) Relleno sanitario, y (14) Minería. De estos solamente los usos (1) al (7) son considerados como usos activos, el uso con código (0) es considerado en la clase pasiva, y por último, los suelos (8) a (14) clasificados como fijos.

En la etapa 2, correspondiente a la calibración del modelo, se utilizaron diferentes herramientas para mejorar la calidad tanto de los datos de entrada como los resultados entregados por el software. La primera metodología de corrección fue la interpretación visual, la cual se reconoce como uno de los métodos adecuados utilizados en el proceso de calibración, en ella se identifican visualmente los cambios que se han producido durante los años de estudio, dando una idea clara de cómo se han distribuido los usos del suelo a lo largo del periodo (White, Engelen, & Uljee, 1997). Algunos estudios utilizan esta metodología como un primer paso para identificar las diferencias más significativas entre los datos simulados y reales (Aljoufie, et al, 2013).

Para la calibración visual fue necesario contar con ingenieros modeladores que conocían el territorio, debido a que este proceso depende del ojo humano para emitir una posible sospecha de error en los datos de entrada al modelo. Los errores encontrados durante esta etapa son en su mayoría debido a las imágenes satelitales utilizadas para la construcción de las capas; la nubosidad y la temporada de lluvias afectaron algunas zonas del modelo; por ejemplo, los cuerpos de agua que en el año 2007 no existían, aparecían en el año 2016 debido a que la imagen satelital fue tomada en temporada invernal.

Posteriormente se elaboró tablas de contingencia, las cuales sirven para comparar el rendimiento global del modelo. En estas tablas se calculan el número total de celdas que han cambiado de una determinada categoría (uso actual) a otra en el set de datos entregado por la simulación (van Vliet, Bregt, & Hagen-Zanker, 2011). Las tablas de contingencia se consideran un gran complemento a la interpretación visual ya que identifican errores que se escapan a la percepción del ojo experto al resaltar el volumen y el tipo de cambios que se presentaron durante el periodo de simulación (Hagen, 2002; Newland, Maier, Zecchin, Newman, & van Delden, 2018). En la Tabla 1 se muestra la última tabla de contingencia construida con este procedimiento.

Cabe aclarar que después de realizado este proceso de corrección seguían existiendo transformaciones poco probables por ejemplo 11 celdas cambiaron de cuerpos de agua a uso comercial, lo cual no estaba permitido en los parámetros del modelo, sin embargo, son muy pocas celdas comparadas a la totalidad del área de estudio, además se encuentran distribuidas de manera dispersa, esto se puede deber a diferencias en las bases catastrales de los años de inicio y fin.

Una vez se corrigieron los datos de entrada al modelo se procedió a realizar la calibración de las curvas de vecindad, este proceso se hizo en 10 iteraciones. El punto de partida, iteración 0, correspondió a la comparación de la capa arrojada por Metronamica incluyendo únicamente las demandas; posteriormente, en la iteración 1, se abarcó la incorporación de la zonificación, la aptitud y la accesibilidad, finalmente las iteraciones 2 a 10 incluyeron la incorporación inercias y la modificación gradual de las curvas de vecindad buscando encontrar niveles más altos en los indicadores de calibración Kappa y Fuzzy Kappa.

Usos de suelo 2007 \ 2016	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	615495	3852	11104	2690	6673	1121	864	8		1526	858		1071		
2	950	13034	2245	14	460	238	316	20		300	260		84		
3		536	16698	271	937	317	589	33		512	187		386		
4	515	12	145	3978	107	104	124	11		71	43		53		
5	1871	507	828	69	4958	258	238	36		1603	379		229		
6	189	69	193	53	148	713	44			148	26		38		
7	196	195	519	138	259	99	3227	7		214	181		98		
8								9486							
9	259				11				19321				115		
10	552	83	659	143	708	206	160			2834	314		144		
11	482	265	505	104	157	50	279	213		342	4155		100		
12												1550			
13													30709		
14														1213	
15													38		6657

Tabla 1 Tabla de Contingencia Final

- | | | |
|----------------------|--------------------|-----------------------|
| 1. Disponible | 6. Industrial | 11. Dotacional |
| 2. Residencial Bajo | 7. Mixto | 12. Pistas Aeropuerto |
| 3. Residencial Medio | 8. Parques | 13. Vías |
| 4. Residencial Alto | 9. Cuerpos de Agua | 14. Relleno Sanitario |
| 5. Comercial | 10. Servicios | 15. Minería |

Los indicadores de calibración fueron calculados con el software Map Comparison Kit 3 desarrollado por RIKS. Para el cálculo del indicador Fuzzy Kappa fue necesario configurar algunos parámetros como el número de celdas a las que se quiere evaluar el grado de similitud con respecto a cada celda y la función de decaimiento que expresa como se pierde importancia a medida que se aleja de esta. En el estudio se usó un radio de 4 celdas y una función de decaimiento lineal con parámetro 0,5

Validez del Modelo	Rango de Kappa y Fuzzy Kappa
Validez Pobre	Menor a 0,20
Validez Justa	0,20 a 0,40
Validez Moderada	0,40 a 0,60
Validez Buena	0,60 a 0,80
Validez Muy Buena	0,80 a 1,00

Tabla 2. Rangos de Validez del modelo.

Los valores que se obtienen de Kappa y Fuzzy Kappa pueden variar enormemente dependiendo de la calidad de la información construida para los usos de suelo observados en 2007 y 2016, por lo tanto, basados en (C. De Silva et al., 2015) se establecieron los rangos a partir de los cuales se podría aceptar la validez del modelo (Ver Tabla 2). Se estableció con esto que los parámetros del modelo de Bogotá y la región debían estar lo más próximos posibles a un nivel de validez muy bueno.

Kappa	Fuzzy Kappa
0,796	0,853

Tabla 3 Resultados finales de los indicadores de calibración

Con cada iteración se obtuvo un mejor nivel de correspondencia y aunque el valor del Kappa no se logró subir por encima de 0,80, el valor de 0,796 fue considerado valido para ser adoptado dentro del modelo. Se determinó que los valores presentados en la Tabla 3 serían los parámetros con los que se correría el modelo a futuro por lo que se concluyó que el modelo estaba calibrado.

En la etapa 3 correspondiente a la creación de escenarios, la Secretaría Distrital de Planeación realizó un trabajo de proyección de las demandas de usos de suelo para el año 2030 (ver Tabla 4), contemplando el crecimiento poblacional, la densidad de usos de suelo residencial y otros factores económicos que

permitirían estimar el número de celdas por cada tipo de uso, estos datos se incorporaron al modelo como un parámetro externo.

Uso de Suelo	Ocupación 2016 (Ha)	Ocupación 2030 (Ha)
Estrato Bajo	6.679	7.893
Estrato Medio	11.843	14.242
Estrato Alto	2.686	3.555
Industria	5.190	5.938
Comercio	1.118	1.730
Mixto	2.103	2.328
Servicios	2.718	2.890
Total	32.337	38.576

Tabla 4 Datos de demanda de usos de suelo para el año 2030

Adicionalmente la SDP colaboró en la creación de 8 escenarios de desarrollo con diferentes niveles de complejidad, los primeros escenarios tienen un mayor número de restricciones asociados a la zonificación y la construcción de infraestructura, de ahí en adelante, en cada escenario se va habilitando progresivamente diferentes áreas para el desarrollo de usos de suelo activos y se introduce un mayor número de infraestructuras y sistemas de transporte. A continuación, se describe los dos escenarios con mayores diferencias entre ellos, en términos de zonificación e infraestructura de transporte.

Escenario 1 - Tendencial: El Distrito y los municipios mantienen su perímetro de expansión vigente, adicionalmente se aplican restricciones para ocupar el suelo destinado a Capacidad Agrícola. En cuanto a infraestructura no se da la introducción de nuevas infraestructuras de transporte masivo de pasajeros ni la construcción de vías regionales.

Escenario 8 – Con todos los cambios: El Distrito habilita las áreas de vivienda en el norte de la ciudad, mientras que los municipios habilitan sus propuestas de suelo urbano, expansión y suburbano. Adicionalmente, se elimina la restricción para ocupar el suelo denominado Capacidad Agrícola.

En términos de infraestructura, se incluye en la simulación el modo de transporte masivo, férreo, y aéreo, por lo tanto, la oferta de suelo urbanizable se instrumenta bajo estrategias DOT con un buffer alrededor de las estaciones de los nuevos modos de transporte en la región.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

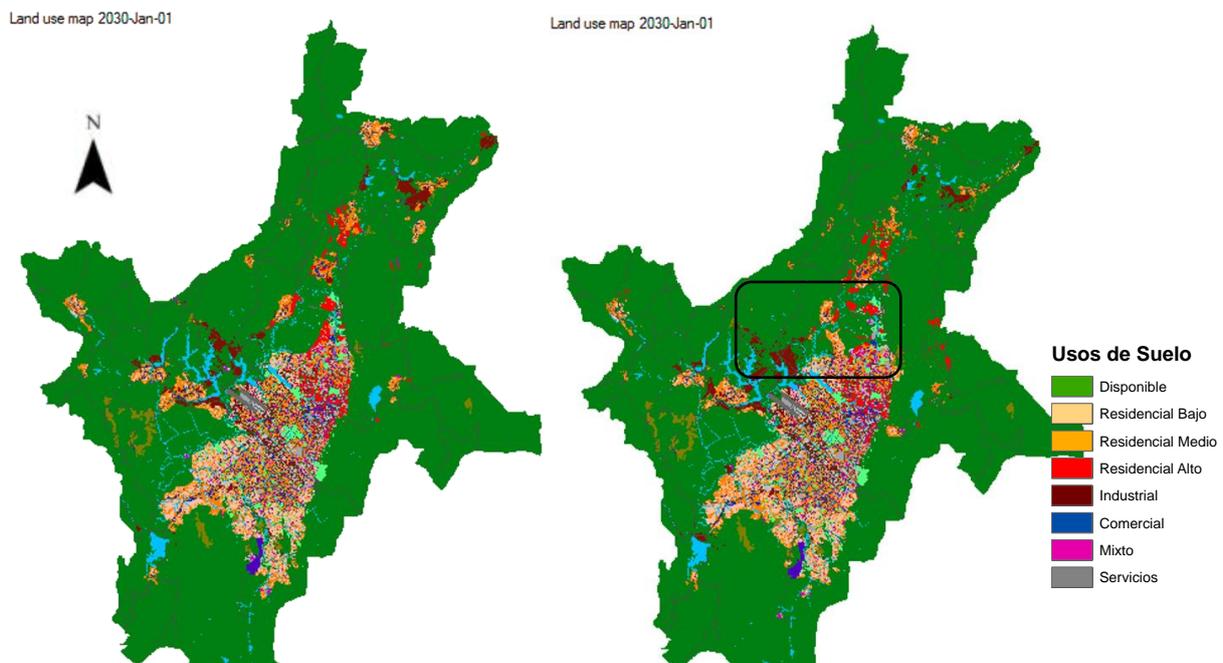


Figura 3 Resultados de la simulación de ocupación al año 2030; izq. Escenario 1 más restringido; der. Escenario 8 áreas de expansión completamente habilitadas

Se obtuvo resultados para cada uno de los escenarios propuestos a través de la modificación de las variables de entrada en el modelo calibrado, en este documento solamente se presentan los resultados para los escenarios con mayor y menor variación de parámetros de entrada, ver

Figura 3.

Un análisis inicial de los resultados muestra que, si bien se presentaron cambios en toda la región, de manera directa se puede reconocer que en el borde noroccidental de Bogotá (área marcada con un recuadro negro en la Figura 3) se generaron patrones diferentes de desarrollo entre los dos escenarios. Una de las razones de estos cambios se explica porque en la imagen de la derecha (Escenario 8) se tiene habilitada la expansión urbana del noroccidente de la capital, y en este sentido es evidente que las industrias elegirán ubicarse lo más cerca posible al casco urbano, generando un clúster industrial justo en la periferia, sobre la calle 80.

Un segundo análisis, indica que con la habilitación de la zona de expansión norte, se da una reubicación de los estratos bajo y medio, poblando principalmente la vía que comunica a Bogotá con el municipio de Cota. Un fenómeno que a su vez incide en la ubicación de los estratos altos, los cuales en el escenario 1 se agrupan mayoritariamente al costado occidental de la autopista norte, pero para el escenario 8 tienden a dispersarse a otras zonas fuera de Bogotá, posiblemente porque al expandir las áreas de suelo disponible los estratos altos preferirán dejar de competir por las áreas exclusivas del norte de la capital y buscaran sitios más tranquilos a las en los municipios aledaños, aprovechando también la mayor accesibilidad que implica la introducción de nuevas infraestructuras de transporte en la región y la reubicación de las industrias.

Usos	Bogotá		Municipios	
	Escenario 1	Escenario 8	Escenario 1	Escenario 8
Disponible	44.983	43.491	172.160	173.652
Residencial bajo	5.448	5.684	2.445	2.209
Residencial medio	8.163	8.722	6.079	5.520
Residencial alto	2.421	2.716	1.134	840
Industrial	2.557	2.701	3.381	3.236
Comercial	1.167	1.174	564	557
Mixto	2.110	2.313	219	16
Servicios	2.558	2.606	332	284

Tabla 5 Cambios en la ocupación usos del suelo 2030 (Ha)

Un último análisis que se deriva de la comparación para los dos escenarios en términos de celdas desarrolladas dentro de Bogotá y fuera de Bogotá, ver Tabla 5. Esta información corrobora los supuestos acerca de ampliar las zonas de desarrollo en el escenario 8; indicando que los usos de suelo activos continuarán poblando Bogotá, en la medida que haya más espacio disponible en el Distrito, esto se puede explicar por la necesidad de las personas de ubicarse donde existen mayores oportunidades de trabajo.

4. CONCLUSIONES

Se logró aplicar un modelo basado en autómatas celulares para la región de Bogotá y 17 municipios aledaños, aportando de esta manera experiencia en el desarrollo de estas herramientas de planificación territorial, en el contexto suramericano. En el proceso se encontró que se presentan retos para la consecución de información relativa a los usos del suelo para los municipios, por lo cual herramientas como las fotos satelitales, y posteriormente la inspección visual, junto con las tablas de contingencia, ayudan a mejorar la calidad de los datos de entrada al modelo de Metronamica y por ende en la calibración del mismo.

La calibración de un modelo de ocupación territorial es un proceso complejo sobre el cual aún existe discusión sobre las herramientas y resultados que se deben utilizar para estimar su precisión en la

representación de los patrones observados en la realidad. En el modelo desarrollado para Bogotá y sus municipios aledaños se usó un método iterativo de calibración manual y un conjunto de los indicadores Kappa y Fuzzy Kappa, obteniendo resultados “muy altos” para los dos, según medidas reportadas por la literatura.

Posteriormente el modelo fue utilizado para simular un set de 8 escenarios de interés para la Secretaría Distrital de Planeación de Bogotá, iniciando en un escenario con altas restricciones en la zonificación y baja inversión en infraestructura de transporte; hasta un escenario final que habilita amplias zonas en la región para nuevos desarrollos inmobiliarios, al tiempo que introduce diferentes infraestructuras de transporte que en la actualidad no hacen parte de las opciones que tienen los habitantes de Bogotá, como el modo férreo y el cable aéreo.

Los resultados de las simulaciones son acordes a las expectativas del grupo de investigación y la Secretaría de Planeación, en el sentido que recogen las dinámicas de ocupación del territorio, particularmente al comparar las políticas que habilitan o no la zona norte de la capital. Tanto los comercios como los usos residenciales medio y bajo entrarán a poblar los proyectos denominados ciudad norte, lagos de torca, entre otros, dado que ofrecen cercanía a los centros de empleo y conectividad con el transporte público. Por su parte los estratos altos preferirán seguir desarrollándose en áreas de baja densidad, generalmente a las afueras de la ciudad cuando se habiliten estos suelos.

5. REFERENCIAS

- Aljoufie, M., Zuidgeest, M., Brussel, M., van Vliet, J., & van Maarseveen, M. (2013). A cellular automata-based land use and transport interaction model applied to Jeddah, Saudi Arabia. *Landscape and Urban Planning*, *112*(1), 89–99. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.01.003>
- Batty, M., & Torrens, P. M. (2005). Modelling and prediction in a complex world. *Futures*, *37*(7 SPEC.ISS.), 745–766. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2004.11.003>
- Brown, D. G., Page, S., Riolo, R., Zellner, M., & Rand, W. (2005). Path dependence and the validation of agent-based spatial models of land use. *International Journal of Geographical Information Science*, *19*(2), 153–174. <https://doi.org/10.1080/13658810410001713399>
- Delden, H. Van, & Hurkens, J. (2011). A generic Integrated Spatial Decision Support System for urban and regional planning. ... *and Simulation Society of Australia and ...*, (December), 12–16. Retrieved from <http://www.mssanz.org.au/modsim2011/Keynote/vandelden.pdf>
- Foody, G. M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, *80*(1), 185–201. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00295-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00295-4)
- Guzman, L. A., Oviedo, D., & Bocarejo, J. P. (2017). City profile: The Bogotá Metropolitan Area that never was. *Cities*, *60*, 202–215. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2016.09.004>
- Hagen-Zanker, A. (2009). An improved Fuzzy Kappa statistic that accounts for spatial autocorrelation. *International Journal of Geographical Information Science*, *23*(1), 61–73. <https://doi.org/10.1080/13658810802570317>
- HAGEN-ZANKER, A., STRAATMAN, B., & ULJEE, I. (2005). Further developments of a fuzzy set map comparison approach. *International Journal of Geographical Information Science*, *19*(7), 769–785. <https://doi.org/10.1080/13658810500072137>
- Hagen, A. (2002). Multi-method assessment of map similarity. *5th AGILE Conference on Geographic Information Science*, 1–8.
- Hagen, A. (2003). Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. *International Journal of Geographical Information Science*, *17*(3), 235–249. <https://doi.org/10.1080/13658810210157822>
- Hagoort, M., Geertman, S., & Ottens, H. (2008). Spatial externalities, neighbourhood rules and CA land-use modelling. *The Annals of Regional Science*, *42*(1), 39–56. <https://doi.org/10.1007/s00168-007-0140-8>
- Meijers, J. (2012). Improving the modelling of land-use changes due to transport system characteristics in Metronamica. Enshede, the Netherlands: Research Institute for Knowledge

Systems & University of Twente.

- Newland, C. P., Maier, H. R., Zecchin, A. C., Newman, J. P., & van Delden, H. (2018). Multi-objective optimisation framework for calibration of Cellular Automata land-use models. *Environmental Modelling and Software*, *100*, 175–200. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.11.012>
- R. Gill Pontziuns, J. (2002). Statistical Methods to Partition Effects of Quantity and Location During Comparison of Categorical Maps at Multiple Resolutions. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, *68*(10), 1041–1049. <https://doi.org/10.1007/s00897020560a>
- RIKS. (2012). Metronamica Documentation. Retrieved from <http://www.metronamica.nl/models.php>
- Silva, C. De, Wimaladasa, J., & Munasinghe, J. (2015). Calibrating Metronamica Land Use Simulation Model for Colombo , Sri Lanka. *Bhumi, the Planning Research Journal*, (September). <https://doi.org/10.4038/bhumi.v4i1.1>
- Silva, E. A., & Clarke, K. C. (2002). Calibration of the SLEUTH urban growth model for Lisbon and Porto, Portugal. *Computers, Environment and Urban Systems*, *26*(6), 525–552. [https://doi.org/10.1016/S0198-9715\(01\)00014-X](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(01)00014-X)
- Torrens, P. M. (2011). Calibrating and Validating Cellular Automata Models of Urbanization. In *Urban Remote Sensing* (pp. 335–345). Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470979563.ch23>
- van Vliet, J., Bregt, A. K., & Hagen-Zanker, A. (2011). Revisiting Kappa to account for change in the accuracy assessment of land-use change models. *Ecological Modelling*, *222*(8), 1367–1375. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.01.017>
- van Vliet, J., Naus, N., van Lammeren, R. J. A., Bregt, A. K., Hurkens, J., & van Delden, H. (2013). Measuring the neighbourhood effect to calibrate land use models. *Computers, Environment and Urban Systems*, *41*, 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2013.03.006>
- Veldkamp, A., & Lambin, E. F. (2001). Editorial: Predicting land-use change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *85*(1–3), 1–6. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00199-2](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00199-2)
- Verburg, P. H., de Nijs, T. C. M., van Eck, J. R., Visser, H., & de Jong, K. (2004). A method to analyse neighbourhood characteristics of land use patterns. *Computers, Environment and Urban Systems*, *28*(6), 667–690. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2003.07.001>
- White, R., Engelen, G., & Ujje, I. (1997). The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics. *Environment and Planning B: Planning and Design*, *24*(3), 323–343. <https://doi.org/10.1068/b240323>
- World Bank. (2018). Urban Development Overview. Retrieved from <http://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/overview>

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Secretaria Distrital de Planeación de Bogotá, quienes hicieron esta investigación posible a través del convenio 366 del 2016, cuyo objeto es aunar esfuerzos interinstitucionales para el desarrollo de metodologías de análisis y evaluación de dinámicas de ordenamiento territorial en Bogotá y la región