



Revista de Ingeniería

ISSN: 0121-4993

reingeri@uniandes.edu.co

Universidad de Los Andes

Colombia

Martínez Rivillas, Alexander; Barragán Zaque, William; Campos Orjuela, Aureliano
Modelo de evaluación de la sostenibilidad territorial de Bogotá: Una propuesta multicriterio con
enfoque modelizador de la movilidad de las ciudades
Revista de Ingeniería, núm. 31, enero-junio, 2010, pp. 16-29
Universidad de Los Andes
Bogotá, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=121015012013>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

Modelo de evaluación de la sostenibilidad territorial de Bogotá: Una propuesta multicriterio con enfoque modelizador de la movilidad de las ciudades

Landscape Sustainability Assessment Model for Bogotá:
A Multi-Criterion Proposal for City Mobility

Alexander Martínez Rivillas^a, William Barragán Zaque^b, Aureliano Campos Orjuela^c

PALABRAS CLAVES

Economía ecológica, gestión urbana, movilidad sostenible, planificación ambiental.

KEY WORDS

Ecological economy, environmental planning, sustainable mobility, urban management.

RESUMEN

El objetivo principal de este artículo es mostrar la capacidad predictiva de un modelo de sostenibilidad territorial para Bogotá, fundamentado en información multidimensional primaria y derivada. Su capacidad predictiva reside en la pertinencia de las variables consideradas y en la articulación consistente de ellas, para explicar fenómenos multifactoriales como la movilidad sostenible de una ciudad. Finalmente, se presenta un conjunto de escenarios posibles para mejorar los procesos de implementación de una política de movilidad sostenible en Bogotá, con base en los resultados de un modelo de evaluación de la sostenibilidad de la ciudad, concebido en virtud del modelo predictivo.

ABSTRACT

The main objective of this essay is to demonstrate the predictability of a landscape sustainability assessment model for Bogotá, based upon primary and secondary sources. The model's predictability lies on the relevance of considered variables, as well as the consistent interaction among those variables in order to explain multifactor phenomena, such as the sustainable mobility of a city. Finally, a set of possible scenarios, which are aimed to improve the implementation of a sustainable mobility policy, will be presented. This set will be the result of the sustainable mobility assessment model created as a predictive model for the city.

a MSc. en Gestión Pública y Desarrollo Sostenible, Candidato a PhD. en Geografía, IGAC-UPTC, Bogotá. Profesor asistente, Departamento de Desarrollo Agrario, Facultad de Agronomía, Universidad del Tolima. Ibagué, Colombia.
✉ alexander_31416@yahoo.es

b MSc. en Fotogrametría y Geoinformática. Profesor asistente, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D.C., Colombia.
✉ wbarraganz@udistrital.edu.co

c Candidato a MSc. en Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad de Manizales. Director y Profesor asistente, Tecnología en Cartografía, Universidad de Cundinamarca. Fusagasugá, Colombia. ✉ cartografia@unicundi.edu.co

INTRODUCCIÓN

En virtud del trabajo coordinado por el Grupo de Investigación en Ciencias de la Sostenibilidad¹, conformado por los autores de este artículo, se emprendió la empresa de diseñar y poner a prueba un modelo de evaluación de la sostenibilidad territorial para Colombia, con previos desarrollos financiados por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial del Colombia [1]. Como consecuencia de estos trabajos, se aplicaron distintas pruebas de modelamiento para el tema de la movilidad en Bogotá, considerando los avances importantes y las limitaciones que se han hecho explícitos en la materia [2]. Dichas pruebas contaron con el soporte de sistemas de información geográfica y herramientas de estimación lineal, multilínea y no lineal, integradas a los fenómenos espaciales. De este modo, se logró modelar el comportamiento de distintas variables urbano-espaciales en estrecha relación con variables ambientales (como zonas verdes, árboles, emisiones de CO₂, temperaturas ambientales máximas promedio mensuales de los últimos 42 años y techos verdes), en distintos escena-

rios temporales hasta el 2020. Finalmente, se consolidaron tres escenarios posibles de política urbana para la movilidad sostenible, con indicaciones claves de los stock críticos de distintas variables urbano-ambientales que deben tenerse en cuenta para que Bogotá sea sostenible en una perspectiva territorial integral².

CONSTRUCCIÓN DE LA METODOLOGÍA Y DEL MODELAMIENTO DE PREDICCIÓN

En primer lugar, se seleccionaron 8 variables urbanos-espaciales relevantes de Bogotá desde 2004 hasta 2008, como se ilustra en la Tabla 1 [3, 4]. Una vez se analizaron sus coeficientes de correlación, se procedió a tamizar las variables con mayor poder explicativo con respecto a las otras, como puede verse en la Tabla 2. Luego, se establecieron las mejores estimaciones lineales y multilíneales que se ajustaran a los datos para obtener el comportamiento de las variables relevantes hasta el 2020. En función de la población, se estimaron las variables de los años futuros bajo

| Período | Población de Bogotá (1) | Pasajeros transportados en miles de buses, busetas, microbuses y colectivos (2) | Promedio anual de vehículos de transporte público (3) | Promedio anual de motocicletas (4) | Promedio anual de vehículos particulares (5) | Promedio de personas que usan bicicleta en el día (6) | Ciclorrutas en Km (7) | Carreles en Km (8) |
|---------|-------------------------|---|---|------------------------------------|--|---|-----------------------|--------------------|
| 2004 | 6734041 | 1690325 | 21506 | 33300 | 814807 | 156627 | 310 | 15338 |
| 2005 | 6840116 | 1657365 | 21228 | 39049 | 869724 | 146703 | 312 | 15348 |
| 2006 | 6945216 | 1244683 | 19289 | 75859 | 998324 | 161181 | 330 | 15348 |
| 2007 | 7050228 | 1315569 | 19612 | 102305 | 1044461 | 175659 | 347 | 15601 |
| 2008 | 7155052 | 1280587 | 19112 | 143000 | 1162382 | 182000 | 354 | 15624 |

Tabla 1. Variables urbano-espaciales de Bogotá 2004-2008. Fuente: [3, 4]

- 1 Grupo de investigación coordinado por Alexander Martínez Rivillas. Desde 2008, desarrolla sus actividades en la Universidad de Cundinamarca, Fusagasugá, con el apoyo de la Dirección de Cartografía. Sus áreas de trabajo se han concentrado en el tema de la planificación y ordenamiento territorial, y modelamientos espaciales de distintos fenómenos naturales.
- 2 El modelamiento propuesto aquí contiene abundantes datos y distintos algoritmos, los cuales no pueden ser explicitados aquí, paso a paso, dada las limitaciones de espacio. No obstante, se expone la información fundamental y se mencionan los algoritmos canónicos para que el lector no especializado pueda valorar el impacto y calidad del modelo.

la condición de que expresaran la mejor correlación y pasaran el filtro de contenidos relevantes causales entre ellas. Las variables restantes que no aprobaron este test se estimaron con base en la información derivada anteriormente, siempre y cuando se respetara el mismo criterio de calidad. En consecuencia, los pronósticos para los años futuros son como se expone en la Tabla 3.

En lo que corresponde a la dimensión ambiental, se seleccionaron 12 variables relevantes con registros desde 2004 hasta 2008; excepto la temperatura ambiente, la cual fue valorada desde los últimos 42 años, para el caso de la Estación Guaymaral (zona norte de la ciudad), y desde los últimos 17 años, para la Estación Doña Juana (zona sur de la ciudad). La Tabla 4 hace explícito lo anterior³ [3, 4, 5].

| Columnas | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| 1 | | | | | | | |
| 2 | -0,85 | | | | | | |
| 3 | -0,90 | 0,99 | | | | | |
| 4 | 0,98 | -0,82 | -0,88 | | | | |
| 5 | 0,99 | -0,88 | -0,93 | 0,99 | | | |
| 6 | 0,88 | -0,75 | -0,79 | 0,94 | 0,89 | | |
| 7 | 0,98 | -0,86 | -0,89 | 0,98 | 0,97 | 0,95 | |
| 8 | 0,89 | -0,60 | -0,66 | 0,90 | 0,85 | 0,92 | 0,92 |

Tabla 2. Correlaciones entre variables urbano-espaciales de Bogotá. Fuente: Elaboración de los autores

| Período | Población de Bogotá (1) | Pasajeros transportados en miles de buses, busetas, microbuses y colectivos (2) | Promedio anual de vehículos de transporte público (3) | Promedio anual de motocicletas (4) | Promedio anual de vehículos particulares (5) | Promedio de personas que usan bicicleta en el día (6) | Ciclorutas en Km (7) | Carriles en Km (8) |
|---------|-------------------------|---|---|------------------------------------|--|---|----------------------|--------------------|
| 2009 | 7259597 | 1094000 | 18229 | 161238 | 1232000 | 188745 | 361 | 15658 |
| 2010 | 7363782 | 994000 | 17581 | 189127 | 1318000 | 196973 | 373 | 15740 |
| 2011 | 7467804 | 900000 | 16930 | 217085 | 1404000 | 205220 | 385 | 15822 |
| 2012 | 7571345 | 812000 | 16282 | 244977 | 1490000 | 213448 | 397 | 15905 |
| 2013 | 7674366 | 730000 | 15639 | 272602 | 1575000 | 221597 | 409 | 15986 |
| 2014 | 7776845 | 654000 | 15003 | 299958 | 1659000 | 229667 | 421 | 16067 |
| 2015 | 7878783 | 583000 | 14367 | 327314 | 1744000 | 237738 | 433 | 16147 |
| 2016 | 7980001 | 517000 | 13731 | 354670 | 1828000 | 245808 | 445 | 16228 |
| 2017 | 8080734 | 457000 | 13107 | 381489 | 1911000 | 253719 | 456 | 16307 |
| 2018 | 8181047 | 401000 | 12477 | 408577 | 1994000 | 261710 | 468 | 16387 |
| 2019 | 8281030 | 351000 | 11853 | 435397 | 2077000 | 269622 | 479 | 16466 |
| 2020 | 8380801 | 304000 | 11236 | 461948 | 2159000 | 277455 | 491 | 16544 |

Tabla 3. Variables urbano-espaciales estimadas de Bogotá 2009-2020. Fuente: Elaboración de los autores

3 Las emisiones fueron estimadas en función de [5] y las capturas fueron estimadas en función de [6].

Del mismo modo, se analizaron las correlaciones de mayor peso explicativo y la relación causal entre las variables seleccionadas; en consecuencia, se estimaron los datos requeridos para los escenarios futuros (Tabla 5).

Primero, se dispuso de la variable población con mejores correlaciones y explicaciones causales de los

fenómenos para estimar los datos de otras variables. Las variables que no pudieron ser explicadas por la variable población fueron estimadas en función de otras variables con mejores desempeños explicativos. Bajo esta circunstancia, se definieron los datos de los años futuros, según la Tabla 6 [3, 4, 6].

| Periodo | Población de Bogotá (1) | | | | | | | | | | | |
|---------|--|---------|-------|--------|---------|-------|---------|---------|-----------|--------|--------|------|
| | Pasajeros transportados en miles de buses, busetas, microbuses y colectivos (2) | | | | | | | | | | | |
| | Promedio anual de vehículos de transporte público (3) | | | | | | | | | | | |
| | Promedio anual de motocicletas (4) | | | | | | | | | | | |
| | Promedio anual de vehículos particulares (incluye taxis) (5) | | | | | | | | | | | |
| | Carriles en Km (6) | | | | | | | | | | | |
| | Emissions de CO ₂ Ton/año del total de fuentes móviles (7) | | | | | | | | | | | |
| | Captura de CO ₂ en Ton/año de árboles de Bogotá (8) | | | | | | | | | | | |
| | Captura de CO ₂ en Ton/año de zonas verdes (9) | | | | | | | | | | | |
| | Temperatura promedio mensual máxima de cada año (Estación Aeropuerto Guaymaral) (10) | | | | | | | | | | | |
| | Temperatura promedio mensual máxima de cada año (Estación Doña Juana) (11) | | | | | | | | | | | |
| | Velocidad promedio general en km/hora (12) | | | | | | | | | | | |
| 2004 | 6734041 | 1690325 | 21506 | 33300 | 814807 | 15338 | 4301311 | 5121792 | 1244529,4 | 14,832 | 14,212 | 32,8 |
| 2005 | 6840116 | 1657365 | 21228 | 39049 | 869724 | 15348 | 4600000 | 5142528 | 1247892,5 | 14,864 | 14,26 | 28,7 |
| 2006 | 6945216 | 1244683 | 19289 | 75859 | 998324 | 15348 | 5408571 | 5163264 | 1251352,8 | 14,896 | 14,308 | 28 |
| 2007 | 7050228 | 1315569 | 19612 | 102305 | 1044461 | 15601 | 5769181 | 5184000 | 1254813,1 | 14,928 | 14,356 | 27 |
| 2008 | 7155052 | 1280587 | 19112 | 143000 | 1162382 | 15624 | 6551261 | 5227200 | 1262025,4 | 14,96 | 14,404 | 22 |

Tabla 4. Variables urbano-ambientales Bogotá 2004-2008. Fuente: [3, 4, 5, 6]

| Columnas | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | | | | | | | | | | | |
| 2 | -0,85 | | | | | | | | | | |
| 3 | -0,90 | 0,99 | | | | | | | | | |
| 4 | 0,98 | -0,82 | -0,88 | | | | | | | | |
| 5 | 0,99 | -0,88 | -0,93 | 0,99 | | | | | | | |
| 6 | 0,89 | -0,60 | -0,66 | 0,90 | 0,85 | | | | | | |
| 7 | 0,99 | -0,86 | -0,92 | 0,99 | 0,99 | 0,86 | | | | | |
| 8 | 0,98 | -0,78 | -0,85 | 0,99 | 0,99 | 0,88 | 0,99 | | | | |
| 9 | 0,98 | -0,78 | -0,85 | 0,99 | 0,99 | 0,88 | 0,99 | 0,99 | | | |
| 10 | 0,99 | -0,84 | -0,90 | 0,98 | 0,99 | 0,89 | 0,99 | 0,98 | 0,98 | | |
| 11 | 0,99 | -0,84 | -0,90 | 0,98 | 0,99 | 0,89 | 0,99 | 0,98 | 0,98 | 0,99 | |
| 12 | -0,95 | 0,72 | 0,80 | -0,93 | -0,94 | -0,79 | -0,94 | -0,97 | -0,97 | -0,95 | -0,95 |

Tabla 5. Correlaciones entre variables urbano-ambientales de Bogotá. Fuente: Elaboración de los autores

| Período | Población de Bogotá (1) | Pasajeros transportados en miles de buses, busetas, microbuses y colectivos (2) | Promedio anual de vehículos de transporte público (3) | Promedio anual de motocicletas (4) | Promedio anual de vehículos particulares (incluye taxis) (5) | Carriles en Km (6) | Emissions de CO ₂ Ton/año del total de fuentes móviles (7) | Captura de CO ₂ en Ton/año de árboles de Bogotá (8) | Captura de CO ₂ en Ton/año de zonas verdes (9) | Temperatura promedio mensual máxima de cada año (Estación Aeropuerto Guaymaral) (10) | Temperatura promedio mensual máxima de cada año (Estación Doña Juana) (11) | Velocidad promedio general en km/hora (12) |
|---------|-------------------------|---|---|------------------------------------|--|--------------------|---|--|---|--|--|--|
| 2009 | 7259597 | 1094000 | 18229 | 161238 | 1232000 | 15658 | 7026480 | 5335372,8 | 1268584,2 | 14,9577 | 14,39655 | 21,8847279 |
| 2010 | 7363782 | 994000 | 17581 | 189127 | 1318000 | 15740 | 7586770 | 5360601,6 | 1272788,4 | 14,9889 | 14,44335 | 20,53973 |
| 2011 | 7467804 | 900000 | 16930 | 217085 | 1404000 | 15822 | 8147060 | 5385830,4 | 1276992,6 | 15,0201 | 14,49015 | 19,3548645 |
| 2012 | 7571345 | 812000 | 16282 | 244977 | 1490000 | 15905 | 8707350 | 5411059,2 | 1281196,8 | 15,0513 | 14,53695 | 18,3029092 |
| 2013 | 7674366 | 730000 | 15639 | 272602 | 1575000 | 15986 | 9261125 | 5436288 | 1285401 | 15,0822 | 14,5833 | 17,3728669 |
| 2014 | 7776845 | 654000 | 15003 | 299958 | 1659000 | 16067 | 9808385 | 5461516,8 | 1289605,2 | 15,1128 | 14,6292 | 16,5447273 |
| 2015 | 7878783 | 583000 | 14367 | 327314 | 1744000 | 16147 | 10362160 | 5486745,6 | 1293809,4 | 15,1434 | 14,6751 | 15,7856157 |
| 2016 | 7980001 | 517000 | 13731 | 354670 | 1828000 | 16228 | 10909420 | 5511974,4 | 1298013,6 | 15,174 | 14,721 | 15,1028044 |
| 2017 | 8080734 | 457000 | 13107 | 381489 | 1911000 | 16307 | 11450165 | 5537203,2 | 1302217,8 | 15,204 | 14,766 | 14,4853893 |
| 2018 | 8181047 | 401000 | 12477 | 408577 | 1994000 | 16387 | 11990910 | 5562432 | 1306422 | 15,2343 | 14,81145 | 13,9178955 |
| 2019 | 8281030 | 351000 | 11853 | 435397 | 2077000 | 16466 | 12531655 | 5587660,8 | 1310626,2 | 15,2643 | 14,85645 | 13,3944507 |
| 2020 | 8380801 | 304000 | 11236 | 461948 | 2159000 | 16544 | 13065885 | 5612889,6 | 1314830,4 | 15,294 | 14,901 | 12,9156936 |

Tabla 6. Variables urbano-ambientales estimadas de Bogotá 2009-2020. Fuente: [3, 4, 5, 6]

PRESENTACIÓN FORMAL DEL MODELO DE PREDICCIÓN⁴

Defínase el conjunto de variables urbano-espaciales como V_e y el conjunto de las variables urbano-ambientales como V_a . Las variables X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , X_5 , X_6 , X_7 y X_8 , que pertenecen a V_e , y las variables Y_1 , Y_2 , Y_3 , Y_4 , Y_5 , Y_6 , Y_7 , Y_8 , Y_9 , Y_{10} , Y_{11} e Y_{12} , que pertenecen a V_a . Entonces, para los escenarios futuros 2009-2020 de V_e , se tienen las siguientes relaciones causales acompañadas de correlaciones directas o inversas en un rango de (0,92-0,99), así: $(X_5, X_7)=f(X_1)$, $(X_3, X_4)=f(X_5)$, $(X_2)=f(X_3)$, $(X_6)=f(X_4)$, $(X_8)=f(X_7)$, siendo las funciones transformadoras lineales o multilineales según el caso, ajustadas con el método de mínimos cuadrados, las cuales permitieron estimar los datos

futuros de X_2 a X_8 . En este sentido, la variable rectora y únicamente conocida para los escenarios futuros es X_1 , pues es aquélla que permite, inicialmente, inferir la serie de estimaciones de X_2 a X_8 . Por tanto, se debe colegir que: $(X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8)=\gamma(X_1)$, siendo γ la función de relación que explica el vínculo causal (en el rango exigente de correlaciones mencionado atrás) de todas las variables en función de X_1 , esto es, la variable población.

Para el caso de V_a , los escenarios futuros 2009-2020 contaban con los datos Y_1 , Y_2 , Y_3 , Y_4 , Y_5 , Y_6 , los cuales fueron estimados antes, y con los datos Y_8 y Y_9 , los cuales fueron estimados con base en la tasa lineal de crecimiento de los árboles y las zonas verdes de la ciudad según la información base del período

4 Este modelo fue diseñado, en su estructura fundamental, por Alexander Martínez Rivillas, como parte de una investigación sobre modelos de sostenibilidad para mitigar el riesgo territorial integral.

2004-2008⁵. Para las variables desconocidas, se registraron las siguientes relaciones causales acompañadas también de correlaciones directas e inversas en un rango de (0,94-0,99): $(Y7)=f(Y5)$, $(Y10)=f(Y1)$, $(Y11)=f(Y1)$, $(Y12)=f(Y5)$, lo que, en efecto, indica que $(Y10, Y11)=f(Y1)$ y que $(Y7, Y12)=f(Y5)$. Las funciones estimadas fueron relaciones lineales o multilineales, según el caso, excepto la función de la velocidad promedio vehicular de la ciudad $Y12$, la cual se estimó con una relación no lineal⁶, dado el comportamiento asintótico de la misma.

SUPUESTOS TERRITORIALES DEL MODELO DE EVALUACIÓN PARA 2009-2020⁷

Para diseñar los tres escenarios posibles de sostenibilidad de la movilidad de Bogotá en materia de ordenación territorial, se establecieron las siguientes condiciones: la zona urbana del POT vigente es inmodificable (37.414 has) para todos los años futuros; la zona bruta urbanizable es de 4493 has [7]; el crecimiento de la población proyectado por el DANE a 2020 es inapelable (lo que no indica que después de este año no se puedan implementar políticas demográficas que redistribuyan la población en sus anillos metropolitanos); no es posible sustraer zonas verdes, árboles, vías carril y ciclorutas, registrados y estimados aquí, para otros usos; es posible expropiar

y redensificar en zonas de desarrollo, consolidación y conservación; finalmente, los modelamientos de la Mesa de Planificación Bogotá Región de 2003 [8] respecto a las tasas de superficie de suelo futuras requeridas para 2020 en los usos de vivienda, comercio y finanzas, industria, vías de nuevos desarrollos y servicios sociales, son consideradas supuestos de partida (lo que no indica que las índices de ocupación y construcción no puedan ser modificados en proporción a estas tasas).

RESTRICCIONES DE MOVILIDAD DEL MODELO DE EVALUACIÓN PARA 2009-2020

Para diseñar los tres escenarios de sostenibilidad en materia de movilidad, se observaron las siguientes restricciones: existe un stock crítico del parque automotor de la ciudad (incluyendo motos) en función de la minimización del riesgo de colisión (las Figuras 1, 2 y 3 representan la densidad de ocupación vial de la ciudad si el crecimiento del parque automotor sigue la tendencia estimada aquí), respecto a una velocidad promedio seleccionada para maximizar el flujo vehicular a tono con esta minimización del riesgo; esto es, 10 metros entre vehículos y 30 km/h de velocidad promedio de la ciudad⁸ (este flujo no considera los tiempos de viaje determinados por la semaforización, pero sí la ocupación vehicular máxima de la ciudad)

-
- 5 Para calcular los niveles de captura de CO₂, se presume que un árbol promedio de la ciudad tiene 2.5 metros de diámetro de copa, una superficie de hoja de 266 metros cuadrados y una captura promedio de CO₂ de 1,728 toneladas año. Para las zonas verdes se presume que un metro cuadrado de césped con 3 centímetros de alto tiene una superficie de hoja de 6 metros cuadrados y una captura promedio de 6,48 kilogramos año de CO₂ [6].
- 6 En este caso, la mejor función para $(Y_{12})=f(Y_5)$ fue $Y_{12} = 17.592 Y_5^{-0.94}$, con una correlación de -0,94.
- 7 Este modelo fue diseñado, en su estructura fundamental, por Alexander Martínez Rivillas, como parte de una investigación sobre modelos de sostenibilidad para mitigar el riesgo territorial integral.
- 8 En un escenario ideal, el modelo permite estimar el stock crítico de vehículos y motos en función de las vías disponibles en la ciudad y de la minimización del riesgo de colisión, como parámetros ideales de sostenibilidad social y ambiental. En este sentido, se supuso un tiempo de reacción del conductor de 0.5 s, un fuerza de frenado de 2/3 del peso del automotor y una velocidad (v) promedio óptima de la ciudad de 30 km/h. Bajo estas condiciones, la distancia entre vehículos y motos (d) que minimiza el riesgo de colisión en Bogotá será de 10 metros, según la ecuación canónica $(3/4)(v^2/g)+(1/2)v \cdot d=0$, siendo g la gravedad [9].

y del área disponible de ocupación vehicular, dados los kilómetros carril registrados y estimados (se promediaron 8 mt² de ocupación de un vehículo y 3 mt² de ocupación de una moto). Se supone que del 100% anual del parque automotor de vehículos sólo el 70% está en circulación permanente y que el 100% de las motos circulan simultáneamente; así mismo, que los vehículos particulares y taxis absorben el 80% de los pasajeros anuales que deja de cautivar el transporte público en los datos registrados y estimados, y que las motos absorben el restante 20%.

REQUISITOS AMBIENTALES DEL MODELO DE EVALUACIÓN PARA 2009-2020

Para diseñar los tres escenarios de sostenibilidad en materia ambiental, se cumplieron las siguientes condiciones: es posible implementar techos verdes y es viable prescindir del sistema TransMilenio para escenarios de déficit de suelo disponible para vías troncales e implementar líneas de metro; es admisible y necesario sustituir la mitad del parque automotor de energía fósil por vehículos eléctricos o con cero emisiones de GEI (Gases de Efecto Invernadero); la temperatura promedio de la ciudad debe estabilizarse con mayor potencial de captura de CO₂ disponible (no requeridos para capturar el CO₂ emitido por la ciudad) de los ecosistemas urbanos; los ejes ambientales propuestos tendrán un árbol cada 10 metros y las zonas verdes propuestas tendrán un árbol cada 100 mt²; la ciudad cuenta, hoy mismo, con disponibilidad de suelo para sembrar 130.000 árboles [10]⁹ (distintos a los implantados en los ejes ambientales y en las nuevas zonas verdes), los cuales se tendrán en cuenta para cada uno de los escenarios; las temperaturas prome-

dio de la ciudad en las estaciones Guaymaral y Doña Juana se estimaron (según una relación lineal) en función del déficit de captura de CO₂ para el período 2009-2020 (en virtud de su alta correlación, -0,99, en cada caso), sobre la base de los datos de déficit de captura y temperaturas 2004-2008, teniendo en cuenta que estos últimos fueron normalizados mediante una relación lineal de los últimos 42 y 17 años, respectivamente; y las zonas verdes, los techos verdes y los árboles de Bogotá deben estar en capacidad de superar razonablemente la demanda anual de captura de CO₂ para 2020.

ESCENARIOS DE SOSTENIBILIDAD DE LA MOVILIDAD EN BOGOTÁ PARA EL 2020, SEGÚN EL MODELO DE EVALUACIÓN

El escenario A supone las siguientes situaciones críticas: existe en la zona urbana un déficit de 1000 has para poder suplir la demanda de usos para el 2020, aún incrementándose el índice de construcción en 70% respecto a la propuesta de la Mesa de Planificación Bogotá Región, 2003 [8]. Es necesario contar con un stock crítico de vehículos y motos, para controlar la demanda futura de captura de CO₂, minimizar el riesgo de colisión y optimizar la zona urbana existente; estabilizar la temperatura promedio máxima mensual en 14,55 grados centígrados, al generar un potencial de captura con zonas verdes y árboles de 8 millones de ton; y combinar el sistema de transporte TransMilenio con líneas de metro, y el uso de las bicicletas y las motos para poder suplir la demanda de pasajeros en el 2020, dado el volumen de motos y vehículos que deberían salir de circulación según las tendencias registradas y estimadas, como lo indica la Tabla 7.

| Cantidades | Observaciones |
|------------|--|
| 300 | Viviendas por has (10 pisos promedio) |
| 334030 | Viviendas nuevas |
| 1113 | has nuevas para vivienda |
| 228 | has nuevas para industria. El índice de construcción se incrementa 70% respecto a MN&A-MPR [8] |
| 26 | has nuevas para comercio y financieras. El índice de construcción se incrementa 60% respecto a MN&A-MPR [8] |
| 482 | has de vías nuevas con ejes ambientales según estimaciones de este estudio |
| 3500 | has nuevas en zonas verdes destinadas a parques |
| 150 | has nuevas para servicios sociales. El índice se incrementa un 60% respecto a MN&A-MPR [8] |
| 5500 | has Demanda de suelo nuevo para 2020 según escenario |
| -1007 | has Déficit de suelo para 2020. No es posible suplir esta demanda sin expropiar y redensificar fuertemente en altura (10 pisos o más para vivienda, comercio y servicios sociales, y 5 pisos o más para industria), y sin expropiar y aforar nuevas zonas verdes |
| 324105 | Stock crítico de motos para 2020 con minimización del riesgo |
| 1380000 | Stock crítico de vehículos para 2020 con minimización del riesgo |
| 790236 | Vehículos que deben salir para el 2020 de la circulación promedio año, si continúa la tendencia estimada |
| 137843 | Motos que deben salir para 2020 de circulación promedio año si continua la tendencia estimada |
| 6551261 | Emisiones de CO ₂ año, en el peor de los casos, las que cuales se contrarrestan de la siguiente forma: |
| 8207136 | Potencial de captura de CO ₂ año de la ciudad |
| 1655875 | Captura excedentaria año de Ton de CO ₂ para otras fuentes y para mercado de emisiones |
| 878325000 | Pasajeros que debe absorber el transporte público para el 2020, para lo cual se requeriría dos veces el sistema TransMilenio de hoy; esto no es posible, dado que el sistema nuevo requeriría 300 has de vías carril e impediría el desarrollo vial de las zonas urbanizables. En consecuencia, una alternativa interesante sería que el sistema TransMilenio absorbiera una parte de la demanda, ampliar el uso de la bicicleta, mantener el uso de la moto y construir líneas de metro subterráneas. Si se estiman entonces 386 has para vías nuevas de las zonas por desarrollar (según MN&A-MPR [8]), y un excedente de 96 has de carril para TransMilenio (si se cumple con la cobertura de la malla vial estimada aquí), entonces el sistema podría dar cobertura a 281,000,000 de pasajeros año, aproximadamente. Por tanto, el metro, las motos y las bicicletas deberían mover 597,000,000 de pasajeros anuales así: las motos podrían mover 175,000,000 de pasajeros año, la bicicleta 166,000,000 de pasajeros año (si se construyen los 490 km estimados de ciclorruta para 2020) y el metro 256,000,000 millones de pasajeros año; lo que implicaría 710,000 pasajeros día. |
| 17202000 | Ton de CO ₂ año. Debe haber un excedente de captura de este valor para estabilizar la temperatura en 14.0 como el valor mensual promedio más alto en el año en la Estación Guaymaral |
| 4672000 | Ton de CO ₂ año. Debe haber un excedente de captura de este valor para estabilizar la temperatura en 14.0 como el valor mensual promedio más alto en el año en la Estación Doña Juana |
| 10937000 | Ton de CO ₂ año. Excedente promedio para bajar la temperatura a 14,0 grados centígrados en la ciudad |
| 1655875 | Ton de CO ₂ año. Con este excedente de captura, la temperatura máxima mensual del año se estimaría en 14,85 grados centígrados en Guaymaral |
| 1655875 | Ton de CO ₂ año. Con este excedente de captura, la temperatura máxima mensual del año se estimaría en 14,25 grados centígrados en Doña Juana |
| 14,55 | Grados centígrados. Temperatura máxima mensual promedio del año en la ciudad, con el anterior excedente de captura |

Tabla 7. Escenario A de Bogotá para 2020: Ciudad compacta y sostenible. Fuente: Elaboración de los autores

En el escenario B, los nudos críticos por considerar son: el stock crítico del parque automotor del escenario A se mantendría, pero no habría suelo disponible para el sistema de transporte TransMilenio, lo que implica la ejecución de líneas de metro subterráneas en el mejor de los casos. Así pues, sería necesario también optimizar el uso del suelo, pues el déficit para 2020 sería de 911 has, aún con el fuerte incremento

de los índices de construcción propuestos; implementar un plan de techos verdes que alcance las 1000 has, desarrollar las mismas zonas verdes y arbolados estimados en A, pero con la ventaja de poder estabilizar la temperatura máxima promedio mensual de la ciudad en 14.53 grados centígrados (la Tabla 8 y las Figuras 4 y 5 ilustran las coberturas de las zonas verdes y techos verdes).

| Cantidades | Observaciones |
|------------|--|
| 300 | Viviendas por has (10 pisos promedio) |
| 334030 | Viviendas nuevas |
| 1113 | has nuevas para vivienda |
| 228 | has nuevas para industria. El índice de construcción se incrementa 70% respecto a MN&A-MPR [8] |
| 26 | has nuevas para comercio y financieras. El índice de construcción se incrementa 60% respecto a MN&A-MPR [8] |
| 386 | has de vías nuevas con ejes ambientales para zonas de desarrollo, según estimaciones de MN&A-MPR [8] |
| 3500 | has nuevas en zonas verdes destinadas a parques |
| 150 | has nuevas para servicios sociales. El índice de construcción se incrementa un 60% respecto a MN&A-MPR [8] |
| 1000 | has de techos verdes |
| 5404 | has. Demanda de suelo nuevo para 2020 según escenario |
| -911 | has. Déficit de suelo para 2020. No es posible suplir esta demanda sin expropiar y redensificar fuertemente en altura (10 pisos o más para vivienda, comercio y servicios sociales, y 5 pisos o más para industria), y expropiar y aforar nuevas zonas verdes |
| 324105 | Stock crítico de motos para 2020 con minimización del riesgo |
| 1380000 | Stock crítico de vehículos para 2020 con minimización del riesgo |
| 790236 | Vehículos que deben salir para el 2020 de la circulación promedio año, si continúa la tendencia estimada |
| 137843 | Motos que deben salir para 2020 de circulación promedio año, si continua la tendencia estimada |
| 6551261 | Emisiones de CO ₂ año, en el peor de los casos, las que cuales se contrarrestan de la siguiente forma: |
| 8430048 | Potencial de captura de CO ₂ año de la ciudad |
| 1878787 | Captura excedentaria año de Ton de CO ₂ para otras fuentes y para mercado de emisiones |
| 878325000 | Pasajeros año. En este escenario, el sistema TransMilenio no tendría espacio físico, dado que la superficie disponible de vías sólo se puede destinar para desarrollo vial de las zonas urbanizables. Por tanto, para 2020 las motos sólo podrían mover 175,000,000 de pasajeros, las bicicletas 166,000,000 de pasajeros, si se cumple con la estimación de ciclorrutas, y el metro subterráneo debería mover 537,325,000 de pasajeros año; aproximadamente 1,492,569 pasajeros día |
| 1878787 | Ton de CO ₂ año. Con este excedente de captura, la temperatura máxima mensual del año se estimaría en 14,84 grados centígrados en Guaymaral |
| 1878787 | Ton de CO ₂ año. Con este excedente de captura, la temperatura máxima mensual del año se estimaría en 14,23 grados centígrados en Doña Juana |
| 14,535 | Grados centígrados. Temperatura máxima mensual promedio del año en la ciudad con el anterior excedente de captura |

Tabla 8. Escenario B de Bogotá para 2020: Ciudad compacta y sostenible. Fuente: Elaboración de los autores

En el escenario C, las ventajas serían significativas: se mantendría el stock crítico del parque automotor (pero la mitad de éste no deberá emitir GEI) y el mismo suelo disponible para vías en zonas de desarrollo; sin ampliación del sistema TransMilenio, con líneas de metro y uso extensivo de la bicicleta, pero con los mismas 1000 has de techos verdes y demás zonas verdes y árboles considerados anteriormente. No obstante, todavía habría un déficit de 911 has para suplir la demanda de suelo en 2020, a pesar de los índices sugeridos. Aún así, el potencial de captura de CO₂ podría llevar la temperatura promedio mensual máxima

del año a 14,3 grados centígrados como se ve en la Tabla 9. Para todos los casos, Bogotá debe mitigar la presión demográfica de forma eficiente desde el 2020 y redistribuirla en sus anillos metropolitanos, pues no podrá, en términos de sostenibilidad territorial, suplir la demanda de suelo nuevo con las tendencias esperadas. Así mismo, si el metro se considera como una estrategia de optimización de la zona urbana de Bogotá, entonces debe ejecutarse si se quiere conservar la zona rural y protegida del Distrito indicada en el POT vigente.

| Cantidades | Observaciones |
|------------|---|
| 300 | Viviendas por has (10 pisos promedio) |
| 334030 | Viviendas nuevas |
| 1113 | has nuevas para vivienda |
| 228 | has nuevas para industria. El índice de construcción se incrementa 70% respecto a MN&A-MPR [8] |
| 26 | has nuevas para comercio y financieras. El índice de construcción se incrementa 60% respecto a MN&A-MPR [8] |
| 386 | has de vías nuevas con ejes ambientales para zonas de desarrollo, según estimaciones de MN&A-MPR [8] |
| 3500 | has nuevas en zonas verdes destinadas a parques |
| 150 | has nuevas para servicios sociales. El índice de construcción se incrementa un 60% respecto a MN&A-MPR [8] |
| 1000 | has de techos verdes |
| 5404 | has. Demanda de suelo nuevo para 2020 según escenario |
| -911 | has. Déficit de suelo para 2020. No es posible suplir esta demanda sin expropiar y redensificar fuertemente en altura (10 pisos o más para vivienda, comercio y servicios sociales, y 5 pisos o más para industria), y expropiar y afilar nuevas zonas verdes |
| 324105 | Stock crítico de motos para 2020 con minimización del riesgo (la mitad sin GEI) |
| 1380000 | Stock crítico de vehículos para 2020 con minimización del riesgo (la mitad sin GEI) |
| 790236 | Vehículos que deben salir para el 2020 de la circulación promedio año, si continua la tendencia estimada |
| 137843 | Motos que deben salir para 2020 de circulación promedio año, si continua la tendencia estimada |
| 3200000 | Emisiones de CO ₂ año, en el peor de los casos, las que cuales se contrarrestan de la siguiente forma: |
| 8430048 | Potencial de captura de CO ₂ año de la ciudad |
| 5230048 | Captura excedentaria año de Ton de CO ₂ para otras fuentes y para mercado de emisiones |
| 878325000 | Pasajeros año. En este escenario, el sistema TransMilenio no tendría espacio físico, dado que la superficie disponible de vías sólo se puede destinar para desarrollo vial de las zonas urbanizables. Por tanto, para 2020, las motos sólo podrían mover 175,000,000 de pasajeros, las bicicletas 166,000,000 pasajeros, si se cumple con la estimación de ciclorutas, y el metro subterráneo debería mover 537,325,000 de pasajeros año; aproximadamente 1,492,569 pasajeros día |
| 5230048 | Ton de CO ₂ año. Con este excedente de captura la temperatura máxima mensual del año se estimaría en 14,66 grados centígrados en Guaymaral |
| 5230048 | Ton de CO ₂ año. Con este excedente de captura la temperatura máxima mensual del año se estimaría en 13,95 grados centígrados en Doña Juana |
| 14,305 | Grados centígrados. Temperatura máxima mensual promedio del año en la ciudad con el anterior excedente de captura |

Tabla 9. Escenario C de Bogotá para 2020: Ciudad compacta y sostenible. Fuente: Elaboración de los autores

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

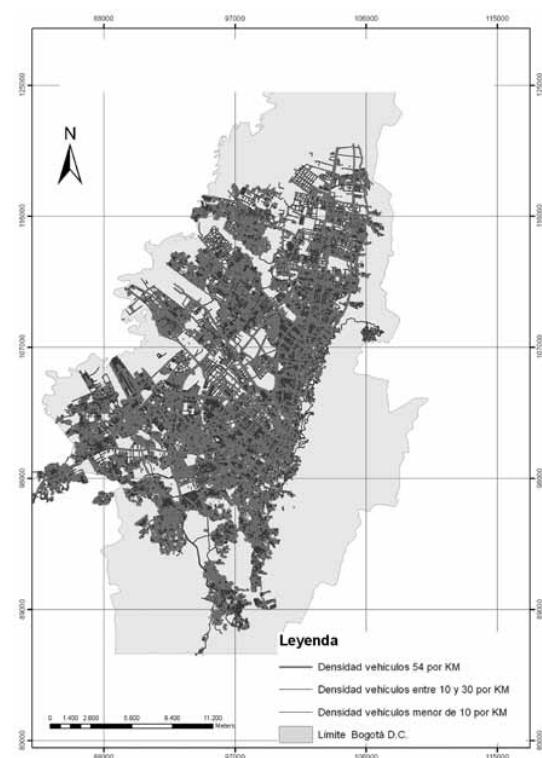
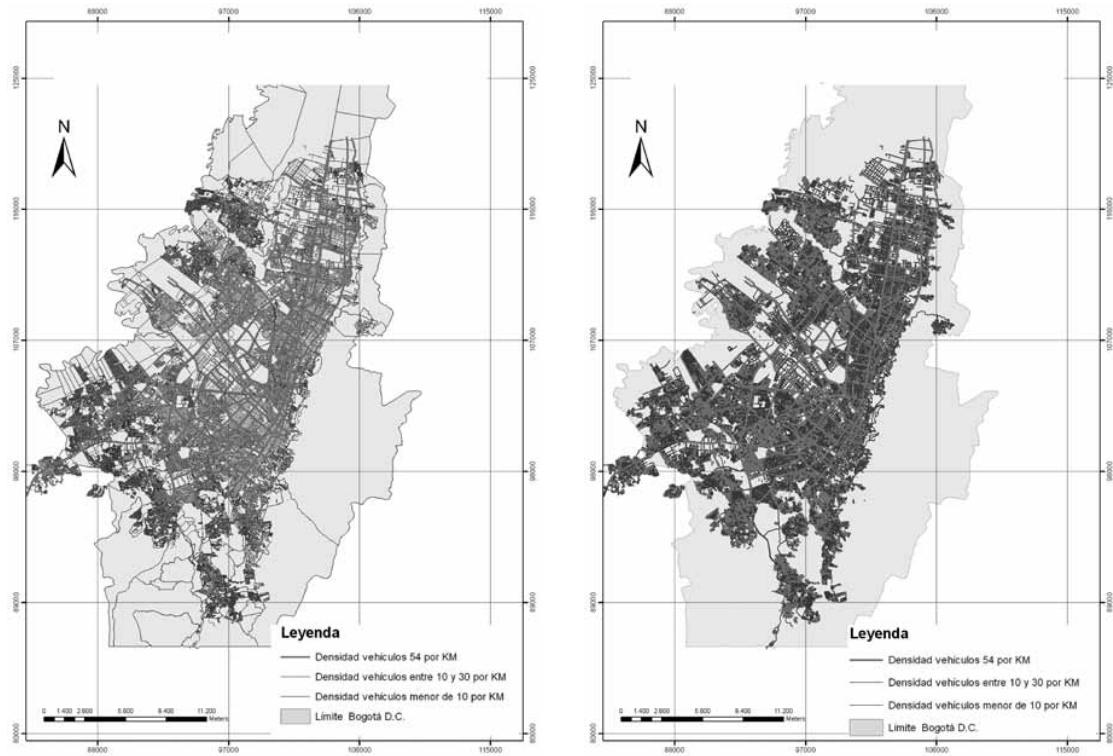
A manera de reflexión, se puede afirmar que los modelos de evaluación de la sostenibilidad territorial deben hacer fuertes reduccionismos de la complejidad de los hechos urbanos, pero pueden considerar el mejor conjunto de variables multidimensionales que se puedan obtener, para hacer más eficiente su poder explicativo, predictivo y prescriptivo [11, 12, 13, 14, 15].

En perspectiva general, las prescripciones que se pueden derivar de esos modelos no sólo dependen de la capacidad predictiva y comunicativa de los mismos, sino también del modo como se emplean sus resultados frente a los actores directamente implicados en la gestión ambiental de la ciudad. Por ello, sólo integrando y haciendo participar a aquellos actores,

es posible implementar progresivamente los resultados fundamentales de la evaluación o mejor, sólo empleando métodos de Evaluación Social Multicriterio (ESM) es posible mejorar los desempeños de la política pública ambiental de la ciudad [16, 17, 18, 19, 20, 21].

El modelo propuesto aquí requiere ajustes permanentes con base en la nueva información suministrada por los hechos urbanos y, especialmente, del comportamiento de las emisiones de CO₂ y de las isotermas a una escala más detallada.

En perspectiva teórica y reflexiva se puede afirmar que, al mismo tiempo que existen límites termodiná-



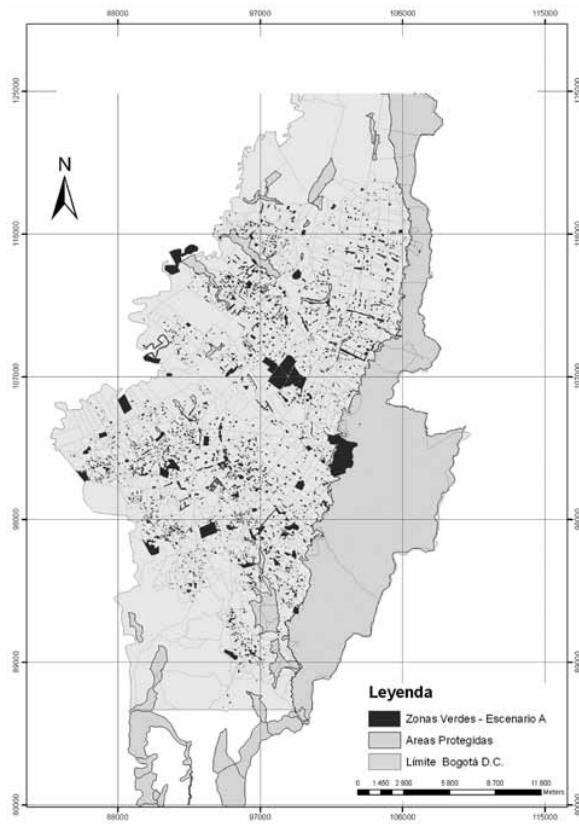


Figura 4. Mapa de zonas verdes – Escenario A, Bogotá D.C.
Elaboración de los autores.

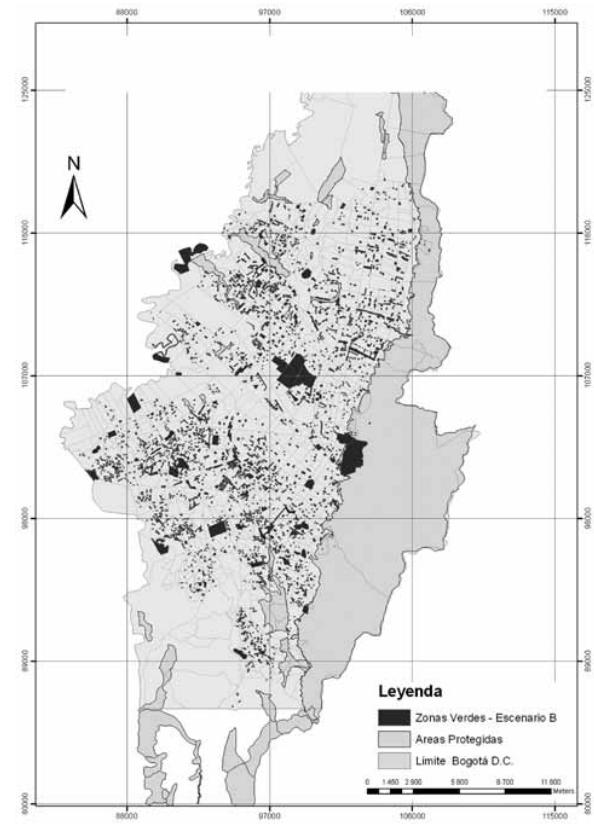


Figura 4. Mapa de zonas verdes – Escenario B, Bogotá D.C.
Elaboración de los autores.

micos de la materia y la energía [22], también se puede, en otro nivel epistemológico, establecer límites socioambientales del espacio físico-urbano y de sus atributos, como riesgos de accidentes, capacidad potencial de captura de CO₂, estabilización de la temperatura media máxima en distintas zonas de la ciudad, estabilización de la velocidad promedio vehicular, y conservación absoluta de las relaciones entre espacio urbano, rural y protegido. Y ésta es precisamente la virtud de este modelo, pues establece límites a la dinámica urbana en función de patrones culturales ambientalistas y científicos de sostenibilidad territorial. Ahora el reto consiste en que dichos patrones culturales penetren en el substrato de la cultura ciudadana y en las concepciones morales y políticas de nuestros partidos políticos y élites económicas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] G. A. Carrión y A. Martínez.

“Estudio crítico sobre el desarrollo de regiones colombianas”. Marzo 28 de 2009. Disponible en: http://1641423224926553522-a-1802744773732722657-sites.googlegroups.com/site/alexandermartinezrivilas/Home/estudio_critico_dllo_regiones_colombianas.pdf?attachauth=ANoY7crTt9eEv92HREL3_Z4bMsnxq0e3mxxOZwKsBjFRnS0BMY8D-7qcpyzfo34F_4ZLhbCpRvODZU3uT53bxmUfGG9inSbtNbG-shevcuuTboMK3wJFrPRR5JAnF-jYsgMtfFh84dSjAZFAw6x42LDSWu8sKEJ83rRFaf-o3gPnN7aawPIZTypNQTNmrobNAvW-6i1tuZo997UDFXelsGnuf3P0Q16GJMPrljzHoGjDC0x85_wOMkUXvQwzsYMLXwrWzcWeKfdpmkd08InzonEr4NhsYgljA%3D%D&attredirects=0

- [2] **R. S.J. Tol.**
 “Integrated Assessment Modelling”. *Working Papers FNU-102, Research Unit Sustainability and Global Change*. Hamburg University. Tol, R. Ideas. Marzo 28 de 2009. Disponible en: <http://ideas.repec.org/p/sgc/wpaper/102.html>
- [3] **Secretaría de Movilidad de Bogotá, Alcaldía de Bogotá.**
 Marzo 28 de 2009. Disponible en:
http://www.transitobogota.gov.co/contenido.asp?plantilla=5&pag_id=768&pub_id=376&cat_id=216
- [4] **Alcaldía de Bogotá.**
 “Todas las ciclorutas funcionando”. Marzo 29 de 2009.
 Disponible en:
http://www.bogota.gov.co/portel/libreria/php/frame_detalle.php?h_id=33528
- [5] **L.A. Giraldo y E. Behrentz.**
Estimación del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá e identificación de variables pertinentes. Bogotá: Universidad de los Andes. Marzo 28 de 2009. Disponible en: <http://columbus.uniandes.edu.co:5050/dspace/bitstream/1992/939/1/Balkema+Tesis+Liliana+Giraldo.pdf>
- [6] **S. W. Peck et al.**
 “Greenbacks from green roofs: forging a new industry in Canada”. Canada Mortgage and Housing Corporation. March 1999. Marzo 28 de 2009. Disponible en: <http://www.greenroofs.org/pdf/Greenbacks.pdf>
- [7] **G. Ardila.**
Territorio y sociedad: El caso del Plan de Ordenamiento Territorial de la ciudad de Bogotá. Bogotá: UNILIBROS, 2003, pp. 77-86.
- [8] **MN&A-MPR.**
Mesa de Planificación de Bogotá Región. Bogotá: 2003, Recuadro 4-42.
- [9] **H. Estrada.**
Notas de Clase, Modelos Matemáticos. Bogotá: Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, 2009.
- [10] **Bogotá Positiva plantará 100 mil árboles**. *Alcaldía de Bogotá, 2009. Marzo 28 de 2009*. Disponible en:
http://www.samuelalcalde.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=861&catid=13&Itemid=82
- [11] **J. Weyant, O. Davidson, H. Dowlatbadi, J. Edmonds, M. Grubb, R. Richels, J. Rotmans, P. Shukla, W. Cline, S. Fankhauser and R. Tol.**
 “Integrated Assessment of Climate Change: An Overview and Comparison of Approaches and Results”. *Climatic Change 1995. Economic and Social Dimensions of Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996, pp. 367-396.
- [12] **L. Hordijk.**
 “Integrated Assessment Models as a Basis for Air Pollution Negotiations”. *Water, Air, and Soil Pollution*. No. 85, 1995, pp. 249-260.
- [13] **D. Pearce, W. Cline, A. Achanta, S. Fankhauser, R. Pachauri, R. Tol, P. Vellinga.**
 “The social cost of climate change: Greenhouse damage and the benefits of control”. *Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change*. J. Bruce, H. Lee E. Haites (eds.). Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1996, pp. 179–224.
- [14] **W. D. Nordhaus.**
Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change. Cambridge, Mass: The MIT Press, 1994.
- [15] **C. D. Kolstad.**
 “Learning and Stock Effects in Environmental Regulations: The Case of Greenhouse Gas Emissions”. *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 31, pp. 1-18.
- [16] **G. Munda, P. Nijkamp and P. Rietveld.**
 “Qualitative Multicriteria Methods for Fuzzy Evaluation Problems: An illustration of economic-ecological evaluation”. *European Journal of Operational Research*, Vol. 82, No. 1, 6 April 1995, pp. 79-97.
- [17] **G. Munda.**
 “Social Multi-criteria Evaluation for Urban Sustainability

Policies”. *Land Use Policy*. Vol. 23, No. 1, January 2006, pp. 86-94.

[18] G. Munda.

“Multicriteria evaluation in a fuzzy environment. Theory and applications in ecological economics”. *Contributions to Economics Series*, Physica-Verlag, Heidelberg, 1995. Review in *Journal of Economic Literature*, Vol. 34, No. 4, December 1996.

[19] G. Munda.

“Measuring Sustainability: A Multi-Criterion Framework”. *Environment, Development and Sustainability*. Vol 7, No. 1, 2005, pp. 117-134.

[20] G. Munda and M. Nardo.

“Mathematical modelling of composite indicators for ranking countries”. *Proceedings of the first OECD/JRC workshop on composite indicators of country performance*. JRC, Ispra, Italy, 2003.

[21] J. Martínez-Alier, G. Munda and J. O'Neill.

“Weak Sustainability of Values as a Foundation for Ecological Economics”. *Ecological Economics*. Vol. 26, No. 3, 1998, pp. 277-286.

[22] N. Georgescu-Roegen.

The Entropy Law and the Economic Process. Harvard University Press, 1971.

[23] N. Georgescu-Roegen.

“Energy and Economic Myths”. *Southern Economic Journal*, Vol. 41, No. 3, 1975.

[24] N. Georgescu-Roegen.

“Inequality, Limits and Growth from a Bioeconomic View Point”. *Review of Social Economy*. Vol. 35, No. 3, December 1977, pp. 361-75.