ACE 19

Electronic offprint

Separata electrónica

MODELO DE EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y AMBIENTAL, DE LA ESTRUCTURA DE ACTIVIDADES Y LA MOVILIDAD, DE LA REGIÓN METROPOLITANA DE BARCELONA: EVALÚAMET

JORGE CERDA TRONCOSO, CARLOS MARMOLEJO DUARTE Y JOSEP
ROCA CLADERA

ACE: Architecture, City and Environment = Arquitectura, Ciudad y
Entorno [en línea]. 2012, Año 7, núm. 19 Junio. P. 129-156

ISSN: [1886-4805](http://www.issn.org/1886-4805)

Website access: http://www-cpsv.upc.es/ace/Articles_n19/articles_pdf/ACE_19_SE_23.pdf

UPCommons Access: <http://hdl.handle.net/2099/12349>

ACE

Architecture, City, and Environment
Arquitectura, Ciudad y Entorno

C

EVALUATION MODEL OF ENERGY AND ENVIRONMENTAL EFFICIENCY OF THE MOBILITY AND THE ACTIVITIES STRUCTURE OF THE METROPOLITAN REGION OF BARCELONA - EVALUAMET -

Key words: Environmental and energetic efficiency, activities and transport project.

Abstract

The problem is related to recent urban dynamics, that denote a marked process of decentralization of both population and economic activities which will generate substantial mobility flows. This new paradigm involves significant impacts to the natural environment. This raises one of the major challenges in the context of public policy, which is the mainstreaming of social and environmental sustainability criteria in the process of construction and evaluation of the different plans and programs. In these process a) is a functional dissociation between the transportation and land use plans, b) is a significant difference in the quantitative methods that support the development of territorial planning, c) social and environmental assessment are dissimilar in regard to criteria and techniques, and d) there is an absence of an integrated vision in shaping the plans.

Therefore, we implemented a procedure to evaluate the environmental and social efficiency of the functionality of metropolitan areas, based on an integrated transport and land use model, specifically to assess social and environmental efficiency. The final model has been adapted to the availability of information, both in its spatial and temporal scale, a condition that makes possible the replication of the model in other regional situations, as well as updating the parameters and calibrated coefficients. The model maintains consistency throughout the calculation procedure, including relevant techniques for each topic, but not the most complex and advanced, because the value of the proposal is the integration between the various issues involved. The implemented sub-models show good performance. While errors are significant in some cases, the model must be applying to assess the differential impact of the situation with and without the project, eliminating the absolute estimation error, giving greater validity to measure the specific effect of project or plan. The results of each stage of the model should be considered as a trend behaviour, which generates a more or less efficient (sustainable) that the base situation. The applications of the model can be very varied and useful to the extent that show traditionally known as the indirect effects (systemic) of projects.

MODELO DE EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y AMBIENTAL, DE LA ESTRUCTURA DE ACTIVIDADES Y LA MOVILIDAD, DE LA REGIÓN METROPOLITANA DE BARCELONA - EVALÚAMET -

CERDA TRONCOSO, Jorge¹
MARMOLEJO DUARTE, Carlos²
ROCA CLADERA, Josep³

Remisión inicial: 15-4-2012

Remisión definitiva: 17-6-2012

Palabras clave: Eficiencia, ambiental, energética, actividades/movilidad.

Resumen

La problemática de las dinámicas urbanas recientes, denotan un acusado proceso de descentralización tanto de la población como de las actividades económicas, con importantes flujos de movilidad, e impactos significativos al entorno natural. Esto plantea grandes desafíos en la formulación de políticas públicas, al requerir la incorporación sistemática de criterios de sustentabilidad social y ambiental en los procesos de desarrollo y evaluación de planes y programas. A escala del planeamiento, se aprecia una disociación operativa en la elaboración de planes de transporte y de ordenamiento, una diferencia significativa en los métodos cuantitativos de soporte a la elaboración del planeamiento territorial, una evaluación social y ambiental disímil en lo que se refiere a criterios y técnicas, y la ausencia de una visión integrada y territorial en la elaboración de dichos planes.

Por lo anterior, se construyó un procedimiento para evaluar la eficiencia ambiental y social de la funcionalidad de áreas metropolitanas basado en un modelo integrado de transporte y uso del suelo, que permita evaluar explícitamente la eficiencia social y sobre todo ambiental del funcionamiento de las ciudades en relación a las actividades instaladas en el territorio, y a los flujos que estas generan. El diseño del modelo se adecuó a la disponibilidad de información, pero manteniendo una coherencia en todo el procedimiento de cálculo (utilizando técnicas pertinentes en cada tema, pero no las más complejas ni avanzadas), ya que el valor de la propuesta es la integración de temáticas. Los modelos y sub-modelos implementados presentan un buen desempeño, pero necesariamente la aplicación debe ser diferencial de la situación con y sin proyecto. Los resultados del modelo deben ser considerados como una

¹ **Jorge Cerda Troncoso:** Centro de Política de Suelo y Valoraciones, Universidad Politécnica de Cataluña. Av. Diagonal 649, cuarta planta, 08028 Barcelona España. Email de contacto: jorge.francisco.cerda@upc.edu.

² **Carlos Marmolejo Duarte:** Centro de Política de Suelo y Valoraciones, Universidad Politécnica de Cataluña. Av. Diagonal 649, cuarta planta, 08028 Barcelona España. carlos.marmolejo@upc.edu.

³ **Josep Roca Cladera:** Centro de Política de Suelo y Valoraciones, Universidad Politécnica de Cataluña. Av. Diagonal 649, cuarta planta, 08028 Barcelona España. josep.roca@upc.edu.

tendencia de comportamiento, evaluando la eficiencia de planes o proyectos, respecto de la situación base. La aplicabilidad del modelo es variada y útil en la medida que ponen de manifiesto los efectos tradicionalmente conocidos como indirectos (sistémicos) de los proyectos.

1. Antecedentes y problema de investigación

El abaratamiento, en términos relativos, del coste de transporte, la revolución de las comunicaciones y el cambio del modelo social tras la caída del sistema fordista, son los procesos que están detrás del nuevo paradigma de utilización del territorio. En las tres últimas décadas las metrópolis del sudoeste europeo, tradicionalmente caracterizadas por su compacidad y diversidad, han experimentado un proceso de dispersión territorial. Las ratios de consumo de suelo se han disparado a la par que los territorios costeros y agropecuarios que las rodeaban se han visto afectados por la expansión urbana (Travisi et al., 2006). Este nuevo paradigma se ha basado fundamentalmente en el uso del automóvil, a la par que la urbanización ha perpetrado en el funcionamiento de los sistemas ecológicos, con importantes externalidades.

Uno de los grandes desafíos actuales, en el marco de la formulación de políticas públicas, es la incorporación sistemática de criterios de sustentabilidad social y ambiental en los procesos de desarrollo y evaluación de planes y programas. En la práctica, las políticas sectoriales de infraestructura y transporte a nivel metropolitano han enfocado la sostenibilidad ambiental a partir de un cambio modal de los viajes, a la par del desarrollo de tecnologías limpias. Esta aproximación reduce el enfoque sólo a un factor tecnológico, sin dar la real dimensión (sistémica) del fenómeno de la movilidad en las áreas metropolitanas, en el sentido de entender que la elección modal es la consecuencia de una serie de factores que tienen que ver con la estructura de actividades en la ciudad, y tal vez más importante con el patrón espacio-temporal de comportamiento de la población (Cerdeja y Marmolejo, 2011).

Por otra parte, los planes de ordenamiento del territorio se encuentran bastante más atrasados en comparación al análisis de transporte, en lo que respecta a sus métodos de evaluación cuantitativa. Pasando desde los lineamientos de las políticas hasta los planes de ordenamiento territorial específicos, se aprecia que el resultado de estos instrumentos se reduce a aspectos constructivos (de stock físico), fuertemente condicionados por normas de edificación. En lo referente a las actividades permitidas (que utilizarán dicho stock), los instrumentos se refieren, en general, a las actividades prohibidas y no se pronuncian de forma explícita y detallada sobre las actividades que finalmente ocuparan dicho stock. A lo anterior se suma que las categorías de actividades permitidas son amplias, en el entendido que es el mercado de suelo quien determine los mejores postores.

Desde el punto de vista ambiental, se puede plantear que las políticas influyen de diferente manera en la planificación de transporte y del ordenamiento territorial. A nivel táctico, es decir, a escalas de un proyecto específico, es a través de estudios específicos (impacto de transporte y evaluación ambiental). A nivel del planeamiento metropolitano, generalmente se utiliza lo que se conoce como proceso de Evaluación Ambiental Estratégica, que asegura la consideración

de variables ambientales en las etapas tempranas de elaboración y estructuración de los distintos planes alternativos. Específicamente para el transporte, son los planes de inversión los que materializan la planificación de obras y servicios a corto, mediano y largo plazo.

Es en esta escala de análisis en donde se aprecia: 1) una disociación operativa en la elaboración de planes de transporte y de ordenamiento territorial; 2) una diferencia significativa en los métodos cuantitativos que soportan la elaboración del planeamiento territorial; 3) una evaluación social y ambiental disímil en lo que se refiere a criterios y técnicas; y 4) la ausencia de una visión integrada y territorial en la conformación de dichos planes.

El contexto actual de toma de decisiones en la planificación del transporte y del ordenamiento del territorio requiere evaluar, monitorear y predecir algunas de las externalidades más importantes ligadas a los procesos metropolitanos contemporáneos, bajo un enfoque integrado del fenómeno, que permitiría detectar los elementos que restan eficiencia al sistema, adelantar los impactos negativos de planes o programas y, en su caso, mitigarlos con medidas preventivas antes de que se implementen.

El presente artículo es parte de una secuencia de cuatro artículos, en los que se presentan las distintas etapas de desarrollo del modelo y sus resultados. Este primer artículo presenta la filosofía y diseño general del modelo en cuatro apartados, de los cuales el segundo apartado corresponde a la filosofía del modelo y al análisis crítico del estado del arte en las distintas dimensiones que lo integran. El tercer apartado expone los objetivos y el diseño, tanto conceptual como funcional, del modelo. Finalmente, en el cuarto apartado se presentan algunas consideraciones finales del modelo.

2. Filosofía del modelo EVALÚAMET y revisión del estado del arte

La investigación se desarrolló bajo un enfoque de *sistema territorial/urbano*, en el cual el transporte se debe entender y re-enfocar como un elemento más del sistema territorial de actividades. Así planteado, el transporte (o interacción) está condicionado e inducido por los otros elementos tales como las actividades no residenciales, las residencias y el comportamiento de las personas. Ahora, cada uno de estos elementos tiene distintas implicancias ambientales, sociales y económicas. Por ejemplo, conocer cuál es la participación en las emisiones espacializadas de una ciudad provenientes de los flujos de transporte versus los que provienen de la actividad industrial, o de la actividad comercial, o de las propias residencias, obliga a entender el sistema territorial en su globalidad, eso quiere decir sus relaciones e intensidades.

Al respecto, la estrategia de desarrollo sostenible de la Unión Europea plantea el desafío de

“un crecimiento económico equilibrado y en la estabilidad de los precios, en una economía social de mercado altamente competitiva, tendente al pleno empleo y al progreso social, y en un nivel elevado de protección y mejora de la calidad del medio ambiente” (Comisión Europea, 2005: p 37).

Para este desafío, el Convenio Europeo del Paisaje (Consejo de Europa, 2000) plantea al *paisaje* como elemento constitutivo. El paisaje se define como “cualquier parte del territorio tal como lo percibe la población, cuyo carácter sea el resultado de la acción y la interacción de factores naturales y/o humanos” (Consejo de Europa, 2000: p 2). Es este concepto de paisaje el que da un enfoque intrínsecamente sistémico al territorio, aunque en la práctica ha sido desperfilado hacia una aproximación físico-natural de los territorios, perdiendo la holística original y por ende su utilidad como enfoque de entendimiento de problemas que se plantean como sectoriales, pero que finalmente son sistémicos.

Por lo expuesto, la filosofía de la investigación tiene su base en reconsiderar los fundamentos originales del paisaje, proponiendo la elaboración de un procedimiento para evaluar la eficiencia ambiental y social de la funcionalidad de áreas metropolitanas, basado en un modelo integrado de transporte y uso del suelo, que permita evaluar explícitamente la eficiencia social y, sobre todo ambiental, del funcionamiento de las ciudades en relación a las actividades instaladas en el territorio y a los flujos que estas generan.

Las dos utilidades principales del procedimiento (modelo) son: 1) servir como herramienta de diagnóstico de la eficiencia, en los aspectos mencionados, del sistema metropolitano de Barcelona; y 2) permitir evaluar los impactos derivados de planes y programas de carácter urbanístico y/o de transporte, de acuerdo con lo estipulado en las correspondientes Directivas Europeas.

Desde la perspectiva teórica, este modelo evidenciará y permitirá trazar los *trade offs* que se generan en el consumo energético y el gasto ambiental, de la movilidad en relación al de las actividades instaladas en el territorio. Conocer con claridad esta relación es fundamental para el diseño de políticas urbanas, en tanto que el transporte y el uso del suelo son en conjunto la mejor estrategia para combatir el cambio climático.

Un esquema de la filosofía de la propuesta se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Filosofía de la propuesta sistémica para evaluar la eficiencia energética y ambiental de planes y proyectos

Fuente: Elaboración propia.

Esta investigación fue desarrollada en el marco del proyecto titulado “Modelo de evaluación de la eficiencia energética y ambiental, de la movilidad y la estructura de usos de suelo, para la región metropolitana de Barcelona” (E 08/08), financiado por el Ministerio de Fomento del Gobierno de España, en el marco de las ayudas públicas en investigación, desarrollo e

innovación en energía y cambio climático en el marco del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2008-2011.

2.1 Revisión del estado del arte

La propuesta de investigación persigue la integración funcional de tres áreas de conocimiento distintas, que son las que se presentan en la anterior Figura 1. Cada una de estas áreas presenta actualmente distintos niveles de desarrollo científico, además de la configuración de distintos grupos de investigación que resultan interesantes de analizar. A continuación se presenta un breve estado del arte en los temas analizados.

A - Modelos de transporte

La metodología tradicional de análisis de transporte se basa esencialmente en la aplicación de una secuencia de modelos matemáticos, conocida como modelo clásico de transporte o modelo de 4 etapas (generación, distribución, partición modal, y asignación), en donde la optimización ha recaído fundamentalmente en los aspectos relacionados con la eficiencia privada (de los operadores y de los usuarios) del sistema, tanto en lo referente a costes como a tiempo (accesibilidad).

Estos modelos tienen sus orígenes en los años 60, cuando los *planners* de la época se enfrentaban a la necesidad de readecuar las ciudades para dar cupo a la movilidad del transporte privado. Es así que la lógica de la planificación de transporte es resolver un problema de asignación de oferta de transporte (de capacidad de paso), para un escenario específico de demanda (necesidad de paso o flujo). En definitiva, es un problema técnico que requiere como input, en sus versiones originales, la estructura espacial de las demandas de transporte a satisfacer.

El modelo tradicional de cuatro etapas considera como primera etapa la predicción, a nivel espacial (zonas de transporte), de la cantidad de viajes que se generaran y la cantidad de viajes que se atraerán. Estas predicciones se realizan en base modelos econométricos, que consideran como variables independientes las actividades en el territorio (hogares por nivel socioeconómico, actividades no residenciales o también llamadas firmas).

La segunda etapa del modelamiento, conocida la cantidad de viajes generados y atraídos por zona, corresponde a la predicción del cómo se distribuyen los viajes, es decir, explicar la cantidad que llega en función de donde procede, y la cantidad que se genera en función de hacia dónde viaja. Los métodos tradicionales para este procedimiento son de dos tipos, siendo el primero los de factor de crecimiento con matrices iniciales conocidas. El segundo tipo de métodos son los denominados modelos gravitatorios y/o entrópicos (masas y fricción del espacio) (Ortúzar, 1998). El resultado de esta etapa es una matriz de distribución de viajes, o también llamada matriz origen destino.

La tercera etapa corresponde a la desagregación (o diferenciación) de la matriz de distribución de viajes, en función del modo de transporte que utilizarán. Para esto se aplican modelos de

elección discreta, basados en la teoría de utilidad aleatoria de los usuarios (Ortúzar, 1998). Este problema se conceptualiza y resuelve como un modelo econométrico tipo logit (cuya variable a explicar es una probabilidad de elección de un modo u otro). El resultado de esta etapa son distintas matrices de distribución de viajes, diferenciadas por modo de transporte. Existen variaciones en el orden de las etapas dos y tres, en el sentido que hay aplicaciones que primero resuelven la partición modal y, posteriormente, distribuyen los viajes (pre-distribucionales) y otras que juntan ambas etapas en una sola, aplicando un modelo de elección para distribuir viajes (elegir destinos) y elegir modos a la vez (nuevas líneas de modelamiento).

Finalmente, la cuarta etapa es en donde se asignan cada una de las matrices de viajes a la red de transporte correspondiente, es decir, se carga la red de transporte con flujos. Los métodos utilizados para esto varían según distintos criterios, por ejemplo considerar o no la capacidad de las vías, considerar la elección de ruta en forma probabilística, solo considerar mínima distancia o costo, considerar el efecto flujo-demora, etc. El resultado de esta etapa es el flujo por modo de transporte y arco de la red.

Estas cuatro etapas se pueden resolver en forma secuencial (que significa el paso consecutivo desde la etapa 1 a la etapa 4, sin una iteración entre etapas) o buscando un equilibrio, lo que significa que luego de llegar a la etapa 4 se alimenta con información la etapa 2 y 3, modificando sus resultados respecto de distribución y partición modal, para nuevamente pasar a la etapa 4 de asignación, y así iterativamente hasta que se logra un equilibrio entre la capacidad ofertada y la demanda asignada.

La lógica de esta secuencia de modelación es el evaluar el efecto de los cambios en la estructura de oferta de transporte (arcos y capacidades), es decir, evaluar proyectos o planes de proyectos de inversión en infraestructura y servicios de transporte. Es por esto que es esta la metodología que generalmente se aplica en la elaboración de distintos planes de inversión en transporte e infraestructura. Es este el caso de la Región Metropolitana de Barcelona (en adelante, RMB). El Plan Director de Movilidad (en adelante, PDM) de la RMB, se elaboró en la plataforma SIMCAT, que es un modelo secuencial de transporte constituido por un modelo de partición modal incremental, un modelo de asignación del tipo equilibrio flujo-demora y con una evaluación multicriterio final. Esta metodología también ha sido utilizada para elaborar el Plan Director de Infraestructura del transporte público y colectivo para la RMB 2001-2010, y al plan de Carreteras de Catalunya 1995-2005 (Autoritat del Transport Metropolità, 2007).

En estos estudios de transporte, la lógica de evaluación de un plan de inversiones (conjunto de proyectos) es, dado un escenario de demanda espacialmente localizada, evaluar el efecto de distintos cambios en la oferta de transporte (que pueden ser en la infraestructura o en los servicios) en los niveles de servicio finales de la red (flujos, velocidades, tiempos, saturaciones, emisiones, etc.). La evaluación de un proyecto o un plan lo que hace es comparar las situaciones del sistema de transporte para un año base (en lo que se refiere a la demanda y a proyectos que se tiene certeza de su desarrollo) y en distintos períodos de corte (proyecciones de la demanda y de proyectos en el tiempo y espacio). La evaluación tradicional que se hace a los proyectos de transporte es la evaluación económica tradicional, con indicadores como el Valor Actual Neto (en adelante, VAN) y la Tasa Interna de Retorno (en adelante, TIR), cuyas variables de entrada son indicadores como la disminución en tiempos de viajes, el gasto de

combustible, los costos de construcción y operación, etc. Estos indicadores se llevan a unidades monetarias a través de distintos valores previamente determinados (Banco Interamericano de Desarrollo, 2006).

En la última década se han incorporado otros indicadores en la evaluación de los proyectos. Unos surgen de la misma estructura de modelación de transporte como ser el efecto en las emisiones de contaminantes atmosféricos, en los accidentes, etc. (Autoritat del Transport Metropolità, 2007; Banco Interamericano de Desarrollo, 2006), y otros surgen de evaluaciones posteriores, como la evaluación ambiental del proyecto (que dicho sea de paso, se alimenta con mucha de la información del modelamiento de transporte).

Como se ha planteado antes, el modelo clásico de transporte debe ser alimentado de forma exógena por la estructura de actividades que existirá en la ciudad para la situación base, y para los distintos períodos de corte temporal a ser considerados en la evaluación (Hunt *et al*, 2005). Hasta ahora la evaluación de planes de transporte han tendido a realizar escenarios de futuro de la ciudad atendiendo, principalmente, a extrapolaciones (atemperadas por medio de diagnósticos más o menos voluntaristas) de las dinámicas de crecimiento y movilidad resultantes del pasado relativamente inmediato. La simple extrapolación de tendencias, sin embargo, se ha demostrado como un instrumento claramente ineficaz a fin de anticipar la localización real de las actividades urbanas, así como la movilidad por ellas generada. Y ello no sólo porque la realidad es siempre más compleja que cualquier modelo humano de desarrollo futuro, sino también, y ante todo, por la naturaleza intrínsecamente deductiva del sistema de planificación del transporte.

B - Modelos de uso de suelo y transporte

En el ámbito académico se ha resuelto el problema del escenario territorial, desarrollando modelos de transporte que también modelan el proceso de localización de actividades en el territorio. Estos son los denominados modelos de usos de suelo y transporte (en adelante, LUTM, acrónimo en inglés de *Land Use Transportation Models*). La lógica de estos modelos es que las decisiones de localización se ven fuertemente condicionadas por las variables de accesibilidad que caracterizan los territorios y que provienen del estado del sistema de transporte e interconexión. Por otra parte, el sistema de transporte se ve condicionado por el sistema de actividades espacialmente localizadas, con lo que se forma una espiral de interdependencia en el tiempo (localización-accesibilidad-transporte).

Los modelos LUTM han evolucionado desde un enfoque agregado hacia el comportamiento de actividades individuales. Lo anterior se ha apoyado fuertemente en la base microeconómica de aproximación y en el enfoque de mercado de muchos de estos modelos. Lo anterior se ha visto posibilitado por la irrupción de los modelos de elección discreta, cuyo aporte ha sido la base para esta mayor complejidad de los modelos, haciéndolos más reales. Pero, paradójicamente, dicha fortaleza de los modelos de elección discreta no se ha incorporado en los modelos de transporte que sustenta al modelo de localización (modelo clásico de cuatro etapas), el cual es el encargado de alimentar las variables de accesibilidad y costos considerados en estos.

La generalidad de los modelos LUTM están enfocados al mercado de la vivienda, y dado que la base conceptual es la maximización de la utilidad, es el precio el resultado del proceso de equilibrio locacional. Respecto de las actividades no residenciales, son menos los modelos que se ocupan de ellas, siendo en general bastante bajos los ajustes a los que se llegan (en el sentido de replicar la situación observada) (SECTRA, 2002).

En términos prácticos, los modelos existentes de LUTM (en plataformas comerciales o estudios específicos) no han tenido un uso intensivo en lo referente a la gestión y planificación urbana. Esto se debe, entre otras causas, a la gran cantidad de información que requieren, a la capacidad técnica de los operadores de los modelos y a los diferentes estándares en el manejo de las variables entre dichos modelos y, por ejemplo, los planes urbanísticos. Lo anterior no quiere decir que no se hayan hecho esfuerzos por resolver estos problemas, pero en la actualidad se podría decir que el uso de estos modelos es bajo.

La primera generación de modelos LUTM se diseñó bajo el supuesto que las actividades se localizan de manera de minimizar el costo del transporte en comparación a otras actividades situadas en otra parte. Este enfoque se puede clasificar como *acceso máximo*, donde el sistema de transporte tiene un papel predominante. Varios modelos surgen de los siguientes modelos básicos: el del remate de propiedades de Alonso y el de entropía de Wilson, los dos datan de 1964.

La segunda generación de modelos LUTM introduce más elementos del mercado en la decisión de localización, como por ejemplo los precios del suelo (arriendos) y precios de bienes. Este enfoque se clasifica como *modelo de mercado lineal*. Los precios del suelo se consideran de diferentes formas, en base a supuestos de competencia del mercado. Así, cuando se supone competencia perfecta, el precio de suelo se enfoca como una función hedónica, dependiente de los atributos promedios de las zonas de atracción. Cuando se supone competencia imperfecta (opciones de localización casi únicas), los precios surgen como resultado de un proceso simulado de remates (Alonso, 1964).

La tercera generación de modelos LUTM introduce gran complejidad, al introducir una representación explícita de la relación directa entre las decisiones de las actividades, es decir, aquella interacción que afecta el comportamiento además de los efectos propios de los precios. Dicha interacción plantea que las opciones de localización se valoran por los denominados atributos de zona. En la literatura económica esta interacción es de tipo múltiple, implicando a todas las actividades, y conocida como externalidad de localización. La complicación de esto es que el entorno construido se genera por la solución del problema de localización, lo que obliga a resolver un problema de equilibrio de localización, no lineal, con un gran número de variables endógenas y cuya solución requiere de técnicas matemáticas avanzadas.

Actualmente existe un considerable número de modelos LUTM, con diferentes niveles de desarrollo y aplicaciones. En el trabajo de Hunt *et al* (2005), el que se sintetiza a continuación, se identifican y caracterizan los seis modelos más representativos de las líneas existentes. Estos modelos son: ITLUP (también conocido como DRAM/EMPAL), MEPLAN, TRANUS, MUSSA, NYMTC-LUM y UrbanSim.

El modelo ITLUP (*Integrated Transportation and Land Use Package*), es un trabajo desarrollado y aplicado por el Profesor Stephen Putman, de la Universidad de Pennsylvania, Philadelphia, EE.UU., desde hace más de 25 años. Incluye una serie de submodelos, dentro de los cuales el más conocido es DRAM (*Disaggregate Residential Allocation Model*) y EMPAL (*Employment Allocation Model*). Estos modelos utilizan derivaciones del modelo de Lowry para localizar hogares (cuatro categorías de ingreso), empleos (cuatro categorías), y estructura de viaje (público y privado). Las proyecciones de empleo, población, viajes, actividades y hogares son exógenas al modelo. Este modelo contiene un submodelo *multinomial logit* de partición modal, así como modelos de asignación a redes en base a variados algoritmos (estocásticos, de equilibrio, etc). La generación y distribución de los viajes los desarrolla el submodelo DRAM, simultáneamente con la localización residencial. Sin embargo, los submodelos DRAM y EMPAL generalmente se usan en forma separada, pero en aplicaciones actuales han sido linkeados a programas comerciales de estimación de demanda, como EMME/2 u otros, lo que muestra la posibilidad de ser alimentados en forma exógena, en lo que se refiere a demanda y costos de viaje.

El modelo MEPLAN es un paquete comercial, con más de 25 años de aplicación, en más de 25 regiones a lo largo del mundo. Es un modelo agregado, que divide el espacio en zonas, que localiza hogares y actividades económicas, modelando los flujos de transporte correspondientes. El corazón del modelo MEPLAN es una matriz *input-output* espacial, que incluye coeficientes técnicos y sectores económicos. Todas las actividades, así también los hogares, son consideradas actividades productoras y consumidoras, cuyos patrones de consumo se expresan en los coeficientes técnicos (del tipo Leontief). La desagregación espacial del modelo debe resguardar la necesidad que la producción satisfaga el consumo localizado por zona, el que se localiza en base a un modelo de elección discreta que considera el precio de los productos. Finalmente lo que resulta es la interacción entre zonas, lo que se transforma en demanda de viajes. La temporalidad se maneja en el sentido de definir cortes temporales específicos. La oferta de suelo es fija para cada zona, en cada corte. Los coeficientes técnicos de consumo de suelo son elásticos al precio, y el precio del suelo se establece por un procedimiento exógeno que equilibra oferta con demanda para cada punto en el tiempo.

El modelo NYMTC-LUM desarrollado por el Profesor Alex Anas en la Comisión Metropolitana de Transito de Nueva Cork (MTC), es una versión simplificada del modelo METROPOLIS, el modelo más reciente, desarrollado por Anas para explicar el desarrollo del mercado de viviendas. El modelo tiene el enfoque de la teoría macroeconómica y simultáneamente modela las interacciones entre las residencias, las zonas comerciales, los empleos y los viajes sin propósito trabajo, con un manejo particular de la demanda y oferta en cada caso. El valor de las viviendas, la renta del suelo comercial y los empleos son determinados en forma endógena por un modelo, que a su vez regula la oferta y demanda para cada mercado. Se resuelve un equilibrio estático para cada corte temporal, encontrando el precio y las cantidades de equilibrio entre oferta y demanda. El modelo de tráfico considera una zonificación muy desagregada en comparación a otros modelos (3.500 zonas para New York). Actualmente, los elementos que modela son población, empleo y edificios, y no tiene un modelo de transporte integrado. Si se conecta con el modelo de demanda de transporte MTC, del cual recibe información de costos y utilidades modales.

El modelo TRANUS, desarrollado por el Dr. Tomás de la Barra, presenta la misma estructura de modelación que MEPLAN, diferenciándose solo en tener más restricciones funcionales y opciones de modelación. Ha sido aplicado en varias regiones de América Central y de Sudamérica.

El modelo UrbanSim es un modelo operacional del mercado de suelo urbano y espacio comercial, desarrollado por el Profesor Paul Waddell. Este modelo complementa a un modelo de transporte de cuatro etapas. El modelo utiliza un enfoque de disponibilidad a pagar. La demanda por stock de edificios (tanto para residencias o firmas) se basa en la disponibilidad a pagar u oferta (precios observados pagados y no hipotéticas disponibilidades a pagar, las que son difíciles de observar). Los compradores maximizan sus beneficios (diferencia entre disponibilidad a pagar y precio cobrado), mientras que los vendedores maximizan el precio a cobrar. La construcción de edificios es demandada por las actividades, para maximizar los beneficios. El precio de los edificios se establece bajo condiciones claras de un submercado asociado al análisis de transporte y a los atributos de las zonas. El modelo opera en un desequilibrio dinámico por año, donde la demanda desarrollo y/o re-desarrolla distintos territorios en base a ganancias esperadas. Las ganancias esperadas se basan en los precios de un determinado año y las elecciones de nuevas construcciones, las que no se consideran disponibles para el siguiente año. La demanda se asocia a los precios y a la oferta, donde los precios se ajustan en base al balance oferta demanda en ese año. La demanda del modelo considera los análisis de transporte entre unidades espaciales o zonas, llegando a tener un nivel de desagregación muy fino, en comparación a otros modelos. Para la oferta, el modelo utiliza predios individuales, que pueden ser desarrollados o re-desarrollados (es decir, demolidos y vueltos a construir), convirtiéndose así en el único modelo que utiliza el precio como unidad de análisis. El modelo también se basa en el análisis de escenarios políticos que incluyen planes de usos de suelo, regulaciones de crecimiento, densidades máximas y mínimas, desarrollos de usos mixtos, renovación urbana, restricciones ambientales, políticas de valor de suelo y las políticas de infraestructura de transporte (y su tarificación), que permite el modelo de demanda de transporte.

El modelo MUSSA es un modelo orientado al mercado de suelo, desarrollado por el Profesor Francisco Martínez de la Universidad de Chile. Es un modelo totalmente integrado con el modelo ESTR AUS, modelo de transporte de cuatro etapas, por lo que unidos conforman un modelo de cinco etapas. El modelo MUSSA se diseñó para pronosticar la localización de actividades, residenciales y no residenciales, en el área del gran Santiago. Este modelo considera que los precios serán asignados a las actividades que sean los mejores postores, definiéndose el equilibrio del mercado como la condición en que todas las actividades se localizan, es decir, la oferta satisface la demanda.

Hasta donde sabemos, ninguno de estos modelos ha sido aplicado a la ciudad de Barcelona.

C - Modelos de consumo de suelo

Los modelos de consumo de suelo, se insertan en lo que se conoce como modelos de cambio de usos de suelo, en donde se consideran la totalidad de posibilidades de usos que tiene el suelo, los que van desde las reservas naturales a los suelos urbanos antropizados. Con esto se

asegura la clasificación de todo el suelo de un territorio, con lo que interesa analizar cómo cambian dichas clasificaciones para un territorio determinado. Este enfoque impregna una lógica de análisis y modelación a estos tipos de modelos, que los ha llevado a un alto nivel técnico y metodológico de desarrollo.

Una completa revisión de modelos relacionados al análisis del proceso de cambio en el uso del suelo, desde el punto de vista espacial, se encuentran en los trabajos de Baker (1989), Shugar y Seagle (1985), Parks y Peters (1990) y Lambin (1994). En los trabajos de Kaimowitz y Angelsen (1998) se revisan los modelos económicos de deforestación, centrándose en los modelos explicativos basados en el comportamiento de los propietarios de la tierra y sus relaciones económicas.

Una primera clasificación operacional de los modelos que explican el cambio del uso del suelo lo realiza Lambin (1994), reconociendo tres categorías: los modelos empíricos, los algorítmicos y los sistémicos. Los primeros replican las causalidades empíricas entre las variables que explican el cambio de uso y suponen que éstas se mantendrán en el futuro. Los modelos algorítmicos modelan los procesos individuales de un sistema con ecuaciones simples, pero con base científica. Finalmente, los modelos sistémicos buscan explicar el funcionamiento integrado de los elementos ecosistémicos.

Actualmente son dos las grandes aproximaciones de los modelos predictivos de cambio de uso del suelo: modelos basados en regresión y modelos en base a transición espacial. Los primeros establecen relaciones entre un amplio rango de variables predictivas y las probabilidades de cambio de uso del suelo. Mientras que los segundos comprenden, principalmente, las técnicas estocásticas basadas en el método de cadenas de Markov y autómatas celulares, donde se asume explícitamente que las áreas vecinas influyen en la probabilidad de transición del área o celda central.

Una de las mayores críticas que se les hacen a las aproximaciones antes presentadas es la excesiva especialización en los procesos matemáticos e informáticos, dejando de lado importantes aspectos como la justificación e implicación social. Frente a esto han surgido algunas experiencias importantes, bajo el enfoque de metodologías mixtas, que privilegian la atención más en las causas socio-económicas y efectos ambientales, que a los aspectos técnicos inherentes al modelo.

En Europa, un ejemplo de estos modelos lo constituye el proyecto *Monitoring Land Use Cover Dynamics* (en adelante, MOLAND), coordinado por el Instituto para el Ambiente y Sustentabilidad de la European Commission's Joint Research Centre. Dicho proyecto tiene como objetivo proveer de información actualizada, estandarizada y comparable del uso de suelo pasado, presente y futuro. La metodología se apoya en interpretaciones y bases complementarias para definir la clasificación final del uso del suelo.

D - Modelos de emisiones ambientales

En relación a las emisiones ambientales, existe una gran diferenciación de las fuentes emisoras. Es así que existen fuentes fijas (que son las que se mantienen en una misma

localización en el tiempo) y fuentes móviles (que son las que cambian dicha localización en el tiempo).

Si bien los métodos de análisis para cada una de ellas son distintos, ambas se consideran finalmente en los sistemas de *cuentas ambientales*. Sobre estos sistemas de cuentas ambientales es que se diseñan los planes ambientales o planes de descontaminación ambiental.

El análisis y modelación de las fuentes fijas se asocia preferentemente al transporte de pasajeros y carga, es decir, a los distintos flujos que utilizan las redes y sistemas de transporte o interacción espacial.

La componente ambiental en los modelos de transporte es reciente y se ha construido en la medida que la toma de decisión ha exigido la incorporación de nuevas variables. Así, la forma en que se ha abordado tradicionalmente este análisis es en base al enfoque de factores de emisión de flujos vehiculares. Al respecto existen variadas plataformas informáticas que se acoplan a las salidas de los modelos de transporte, para cuantificar las emisiones de contaminantes. La mayoría de estos modos de cálculo requiere de una gran cantidad de información, respecto de la operación de los vehículos, para poder bien estimar las emisiones totales. Los factores más comunes que se utilizan son las pendientes de las vías y la velocidad de paso. Los métodos más complejos (como por ejemplo el software MOBILE 6) exigen la información del ciclo de marcha de los vehículos (tiempos y velocidades en cada marcha, número de paradas, tiempo en cada parada, etc.), el tipo de vehículo, etc. A cada una de estas condiciones se le aplica un factor de emisión por tipo de contaminante ya sea deducido en laboratorios específicos de cada país, o factores estándar publicados en la literatura especializada. Con esto se obtienen las emisiones por fuentes móviles que finalmente se integran en fuentes areales.

El análisis y modelamiento de fuentes fijas se asocia principalmente a fuentes puntuales de procesos productivos que sean contaminantes. Un ejemplo de estos son los hornos de panaderías, las calderas de calefacción de edificaciones y los tradicionales procesos productivos de las industrias.

También existen las fuentes fijas areales, las se asocian a grandes superficies que desarrollan procesos emisivos. Es este el caso de los vertederos, zonas de acopio de materiales y también las zonas naturales (con sus emisiones bio y geogénicas) (Santander, 2005).

La forma de modelamiento de este tipo de fuentes de emisión son los modelos de fotoquímica regional, los cuales se estructuran de forma secuencial, aplicado modelos de meteorológicos, modelo de emisiones y un modelo de transporte (de emisiones) en aire y química atmosférica.

Finalmente, los modelos de calidad del aire se enmarcan tanto de las fuentes móviles como fijas (areales y puntuales), y son tratadas a escalas bastante agregadas. De hecho, los modelos de calidad de aire de escala regional consideran el uso de suelo *Urbano* como una fuente areal de emisiones, sin llegar a especificar situaciones de exposición a escalas territoriales pequeñas.

Como se mencionara antes, es la integración entre las fuentes fijas y móviles la que conforma la base de cuentas ambientales, sobre la cual se elaboran los planes y programas de las políticas ambientales. Sin embargo, paralelamente las políticas ambientales presentan metodologías sectoriales específicas, como para el caso del transporte.

E - Modelos de consumo energético

El entendimiento del consumo energético como concepto está fuertemente orientado hacia las condiciones de confort de los habitantes de la ciudad. Los consumos industriales y de otras actividades están relativamente claros. En este sentido, no son tan claros los límites entre la sostenibilidad urbana y la arquitectónica. Esta última es de gran importancia, porque delimita los factores que influyen en el análisis, siendo la escala arquitectónica referida a factores de *confort*, los cuales no tienen paralelo a escala urbana.

Analizando los principales trabajos que se han desarrollado en el tema, se puede apreciar que la estimación de consumos energéticos no se refiere a un solo problema sino que, por el contrario, engloba a una serie de subproblemas, cada uno dirigido a objetivos específicos (Infante, 2006).

Las metodologías de estimación pueden ser analizadas desde dos puntos de vista. El primero de ellos corresponde al enfoque que utilizan, en donde se analizan los supuestos del modelo y el entendimiento, como proceso, del desarrollo del consumo energético. El segundo punto de vista corresponde a la herramienta matemática utilizada, dependiendo ésta del procedimiento matemático que debe ser llevado a cabo para obtener los resultados.

Analizando los trabajos desarrollados en el área se observa que, en la mayoría de los casos, las estimaciones se obtienen para el mismo nivel energético/geográfico requerido, dado la disponibilidad de los datos que se tienen. Aun así, es importante mencionar la existencia de dos enfoques alternativos, los que se distinguen por el proceso que se debe llevar a cabo para llegar al nivel de desagregación deseado:

- *Bottom-Up*: En este caso, la estimación de consumos se desarrolla a partir de un proceso de síntesis, donde son agrupadas las previsiones individuales de los consumos que son abastecidos aguas abajo. Este tipo de metodologías son conocidos como *end-use models* y han sido extensamente utilizados en sistemas de distribución.

- *Top-down*: Esta clasificación comprende a aquellos casos en donde el nivel de datos disponible no es suficiente como para poder realizar las estimaciones al nivel eléctrico requerido. De esta manera, para poder llevar a cabo el proceso de estimación, es necesario desagregar las estimaciones obtenidas aguas arriba, aplicando un cierto criterio de asignación. Este tipo de metodologías han sido bastante menos utilizadas, dado que en la mayoría de los casos, los datos disponibles son suficientes como para llevar a cabo las previsiones al nivel eléctrico deseado.

La mayor cantidad de trabajos al respecto se orienta al consumo energético a escala arquitectónica.

Un buen exponente de este tipo de trabajos es el desarrollado por Catalina *et al.* (2008), que consiste en la construcción de modelos de regresión para estimar la demanda de calefacción mensual de un sector de viviendas unifamiliares en un área de clima temperado. Todos los modelos se basaron a una gran base de datos producto de la simulación dinámica de un diseño específico en 16 grandes ciudades de Francia. Fueron analizados 270 escenarios diferentes con diferentes inputs para la validación. Los datos utilizados como inputs para los modelos de regresión fueron: la forma del edificio, el revestimiento exterior del edificio, la relación entre el área de la ventana y del pavimento, una constante de tiempo para el edificio, además de la relación entre edificios en un entorno inmediato.

El trabajo concluye que es posible prever la demanda de calentamiento de edificios en escenarios mucho más complejos, en los cuales las construcciones adyacentes son espacios no calentados, sótanos o terrazas. Es este el tipo de estudio mayoritario en esta área de investigación.

Son pocos los trabajos que suben su escala de análisis a territorios más extensos o hasta la escala ciudad. A continuación se presentan los trabajos más representativos con niveles de agregación desde barrios a ciudades.

- El trabajo de Heiple y Sailor (2008) desarrolla una técnica para estimar las formas de consumo de energía en sectores residenciales, bajo factores como los diferentes horarios del día, así como las diferentes estaciones del año. El método utilizado fue una combinación entre la simulación energética anual, para prototipos específicos de ciudad y posibles datos geoespaciales, y soporte en los SIG. El aporte del trabajo es el método para estimar el consumo de energía y gas natural para sectores residenciales o comerciales, y no sólo la simulación de edificios.

- El trabajo de Sailor y Lu (2004) presenta una aproximación a los cambios diurnos de temperatura analizando seis ciudades, según estaciones del año, desde el punto de vista de la contribución antrópica al calentamiento de esas ciudades. La principal preocupación es la del fenómeno de las islas de calor, que generan impactos en los niveles de contaminación atmosférica, consumo urbano de energía, confort ambiental, etc. El objetivo es cuantificar estos impactos a partir del balance de la energía existente en la *superficie* de las áreas urbanas. Se evaluaron variables del sector de la construcción y los transportes, obteniéndose como resultados el perfil representativo del calentamiento provocado por las actividades en seis grandes ciudades norteamericanas: Atlanta, Chicago, Los Ángeles, Philadelphia, Salt Lake City y San Francisco. Según los autores, el calentamiento antropogénico se puede dividir en tres componentes, que representarían las mayores fuentes de pérdida de calor provocada por la ocupación humana: los vehículos, el sector de la construcción y el metabolismo humano. Se puede rescatar del estudio el hecho que hace el análisis para la escala urbana.

- El estudio de Kikegawa *et al.* (2006) cuantifica posibles medidas para la reducción del impacto de los edificios urbanos a las islas de calor, provocados por la energía utilizada durante el verano en la ciudad de Tokio. Se adoptó un modelo múltiple escala para describir las interacciones entre los edificios a través de un análisis meteorológico para cada sistema. Las conclusiones sugieren que la reducción en la utilización de aire acondicionado sería la medida

más eficaz para edificios comerciales, y para los edificios residenciales la fracción vegetal en las paredes. Ambas medidas inducirían una reducción en la temperatura del aire próximo al suelo en 0,2 - 1,2 °C.

- El trabajo de Yamaguchi et al. (2007a) propone un modelo de simulación, en el cual las posibles opciones en la gestión de la energía de los diferentes niveles de utilización y gestión puedan ser evaluadas e integradas a escala urbana. Inicialmente fueron evaluados los modelos convencionales para la simulación del uso de la energía en edificaciones, para posteriormente evaluar las capacidades de estas simulaciones en la escala urbana. El modelo desarrollado por los autores busca alternativas energéticas para el sector comercial de la ciudad de Osaka, Japón. También buscan cuantificar el potencial en la reducción de emisiones de CO₂ a través del implemento de nuevos conceptos de gestión de la energía. Para la integración de escala edificio y escala urbana, se aplicó un modelo de análisis clúster. Lo rescatable de este estudio es la demostración que se puede conseguir un modelo para ciudades a partir de un modelo para edificios.

- En otro trabajo de Yamaguchi et al. (2007b) se analizan alternativas posibles para los sistemas urbanos de energía en el largo plazo, que sea capaz de lograr reducciones en las emisiones de CO₂ en un 50% con base a las emisiones actuales en los sectores comerciales de Japón. Pretende dar soporte a la implementación de tecnologías que posibiliten ese cambio a través de una aproximación técnica, desde abajo hacia arriba. La aplicación fue realizada en un distrito de negocios en Osaka, Japón, donde se implementaron varios escenarios de tecnologías, evaluando la situación antes y después de dicha implementación. El resultado obtenido sugiere que se puede lograr una reducción de los 60–90% en las emisiones de CO₂, hasta mediados del siglo XXI. Los autores proponen una simulación con base a una aproximación *bottom-up*. Esta evaluación proporciona datos de entrada para los cambios requeridos en todos los componentes de los sistemas de energía para los edificios, como unidades, y finalmente para su entorno inmediato y la propia ciudad.

- En el trabajo de Chen et al. (2008) se plantea que el crecimiento en los niveles de utilización de la energía en China tiene correlación directa con el rápido desarrollo económico del país. Su objetivo es encontrar un sistema nacional de estadística para el consumo energético en los sectores residenciales chinos, investigando el actual modo de consumo energético en el sector para proveer datos que den soporte para otras investigaciones, como las de la construcción energéticamente eficiente. En el artículo, los autores pretenden definir un sistema estadístico para los cinco diferentes sectores residenciales en China (sectores definidos por ellos), que sea capaz de medir el consumo energético a nivel de ciudades y provincias.

- El trabajo de Ratti et al. (2005) explora los efectos de la textura urbana en el consumo de energía de edificios. Está basado en el análisis de modelos de elevación digitales (en adelante, DEM, por su nombre en inglés *Digital Elevation Model*). Fueron propuestos y discutidos diferentes algoritmos, incluyendo el cálculo de la proporción superficie-volumen en el área urbana y la identificación de áreas pasivas, o sea, las que están dentro de un rango de 6 m. de una fachada. También fue usado un simulador para calcular el consumo de energía en edificios, acoplando el modelo LT con el análisis de DEM, proporcionando simulaciones de energía sobre áreas extensas urbanas. Fueron obtenidos resultados y discusiones para las ciudades de Londres, Toulouse y Berlín. Para las tres ciudades fueron utilizadas las superficies

totales, suelo no construido, volumen construido, superficie vertical, relación superficie-volumen, volúmenes pasivos, entre otras.

De la revisión del estado del arte, a la luz de la filosofía del modelo, se puede concluir lo siguiente:

- Los modelos de transporte han tenido un amplio desarrollo como herramienta de gestión de inversiones en infraestructura y se han hecho cargo, en parte, de la problemática de insertarse en la ciudad como un sistema más, a través del desarrollo de los modelos de usos de suelo y transporte. En la práctica dichas iniciativas se han mantenido en ámbitos académicos, o de estudios específicos, y no han aportado, con todo su potencial, en la gestión espacial de los sistemas urbanos.
- De las distintas orientaciones de los modelos LUTM, se puede rescatar el principio de transferibilidad de la accesibilidad como nexo de unión entre el transporte y la localización de actividades, bajo un enfoque de análisis espacial y temporal.
- Los modelos de consumo de suelo tienen un enfoque fuertemente orientado al suelo natural, integrando el uso urbano o artificializado como uno más de sus categorías. Los modelos utilizados están orientados más bien hacia la predicción del cambio que hacia la explicación y entendimiento del fenómeno. En este sentido, la familia de modelos econométricos son los que presentan mayor potencial de interconexión con temáticas como la localización de actividades, el transporte, etc.
- Los modelos de emisiones ambientales están muy asociados a escalas de análisis individuales, referidos a unidades de contaminación puntual. La consideración de unidades areales presenta un menor desarrollo respecto de las técnicas de modelación y de las especificaciones de las actividades que se desarrollan dentro de ellas.
- Los modelos de consumo energético están fuertemente enfocados al término de confort, por lo que las características constructivas y morfológicas de las edificaciones son vitales. Las pocas aplicaciones agregadas de estos estudios (áreas, barrios, ciudades) se enfrentan bajo los paradigmas *top-down* o *bottom-up*, dependiendo la elección de estos de la información de la que se disponga.

Cabe destacar, que de la revisión del estado del arte no se encontraron modelos que integrasen todos los ámbitos requeridos por este estudio.

3. Objetivos y diseño del modelo

El objetivo principal del modelo es la evaluación de la eficiencia energética y ambiental, de la movilidad y la estructura de usos del suelo, aplicable a la metrópoli de Barcelona (164 municipios). En la práctica se busca aplicar el modelo para evaluar la situación base de eficiencia del sistema metropolitano de Barcelona y, posteriormente, aplicar el modelo en fase predictiva para evaluar distintos planes de infraestructura, transporte y ordenamiento territorial,

y su impacto bajo un enfoque de sostenibilidad (económica, social y ambiental) de los sistemas metropolitanos. Para esto se requirió diseñar un procedimiento metodológico, de base cuantitativa, que uniese funcionalmente submodelos de distintas variables y escalas.

Lo primero que se plantea es una estructura maestra de modelación, cuya filosofía es la de permitir una interdependencia de causalidad iterativa o circular, en donde el uso del suelo está influido por el nivel de accesibilidad y viceversa, y ambos alimenten los modelos de externalidades ambientales de consumo de suelo y emisiones ambientales. Este modelo conceptual se presenta en la Figura 2.

Figura 2. Modelo conceptual para evaluar la eficiencia energética y ambiental de planes y proyectos

Fuente: Elaboración propia.

El modelo conceptual surge de la revisión del estado del arte, incorporando conceptos y criterios de lo existente, pero con la premisa de la integración funcional de los procedimientos, más que con la exactitud o complejidad de los últimos desarrollos científicos en cada tema.

Dicho lo anterior, el modelo reconoce dos escalas de análisis necesariamente diferentes. La primera es la escala macroterritorial que da cuenta de la proyección del crecimiento de la RMB como un todo. Esta proyección se realiza solo una vez en formato paramétrico (dependiente de parámetros que pueden cambiar a voluntad del modelador).

La segunda escala es la microterritorial, que es donde se resuelve la problemática espacial o de ordenamiento de las distintas actividades y de los efectos (interacciones, emisiones, consumos, etc.) que generan estas localizaciones.

En el esquema se reconocen cuatro áreas temáticas que componen el modelo microterritorial, que son: el modelo de localización de actividades, el modelo de transporte, el modelo de

consumo de suelo, y el modelo de externalidades ambientales (energía y emisiones). Así, los enfoques de evaluación que plantea el modelo son tres: la cuantificación del consumo energético ambiental, la cuantificación del consumo del suelo, y la evaluación social de la equidad en el acceso al territorio.

La operación o secuencia, tanto de la implementación como de la aplicación del modelo conceptual, presenta la siguiente estructura:

- El primer paso es determinar la localización de actividades (tanto económicas como residenciales). En la lógica de localización de dichas actividades actúan patrones demográficos de la población (estadísticas vitales, tasas de ocupación, tasas de conformación de hogares), los cupos espaciales para las distintas actividades (en función de planes y normas urbanísticas), y también el comportamiento de interacción espacial en el territorio (cambio de residencia, movilidad cotidiana laboral). El resultado de este procedimiento es el total de población, viviendas y empleos para cada unidad territorial de análisis, en cada momento de tiempo evaluado.
- En el segundo paso se modela la estructura de interacciones (transporte) inducida por el ordenamiento de las actividades residenciales y económicas. Para esto, primero se determinan los totales de viajes generados y atraídos en cada territorio, luego se distribuyen dichos viajes para, finalmente, asignarlos a la red de interacción disponible (la que depende de distintos escenarios de intervenciones). Será la red, con sus costos de interacción, la que influya en la localización de actividades antes presentada.
- El tercer paso tiene que ver con la estimación de los consumos generados por el sistema territorial de actividades y sus interacciones. Los consumos que se consideran en este estudio se refieren al consumo de suelo (suelo artificializado) y al consumo energético (específicamente eléctrico) generado por las distintas actividades localizadas. También se consideran los generados por la interacción espacial (transporte).
- El cuarto paso se relaciona a la estimación de los consumos energéticos y emisiones ambientales generadas tanto por las actividades localizadas, como por los flujos de interacción.
- El quinto y último paso es la evaluación de la eficiencia energética y ambiental del sistema territorial de actividades y sus interacciones.

El modelo evalúa la situación ambiental (energética y de emisiones) de un ordenamiento e interacciones de una situación base del territorio, la que contempla la evolución temporal, es decir, la evaluación temporal-espacial de las actividades y el transporte.

La mensuración de la eficiencia no es un tema simple (Pozueta, 2000; Rueda, 2001). En el presente estudio se ha adoptado la estrategia de evaluación que se refiere a la situación base (es decir el enfoque con y sin proyecto) y no en referencia a un valor absoluto. Lo anterior se debe principalmente a la capacidad de evaluación diferencial de la herramienta, *más que a su exactitud en la predicción de las condiciones futuras.*

Los indicadores de eficiencia son esencialmente espaciales, por lo que se concluye respecto de la eficiencia espacial del sistema, identificando las zonas que se ven favorecidas y perjudicadas por el plan o proyecto a ser evaluado. Así se tiene una visión espacial de la disparidad o de la equidad en la distribución de las externalidades ambientales.

En base a este procedimiento es que se puede evaluar el efecto microterritorial de una inversión en infraestructura de transporte por el hecho que, al cambiar las variables de servicio del sistema de transporte, cambian las tendencias de localización y, por ende, las tendencias de consumo de suelo y externalidades ambientales. También se pueden evaluar políticas o planes de ordenamiento de actividades, en el sentido de restringir o permitir cierto tipo de actividades, lo que alterará los patrones de localización y de interacción, afectando nuevamente los patrones de consumo de suelo y externalidades ambientales.

El esquema expuesto en la Figura 2 se transforma en una secuencia específica de cálculos y de interacción entre distintos sub-modelos matemático/estadísticos, generando el diagrama de flujo del cálculo que se presenta en la Figura 3.

Figura 3. **Modelo operacional de evaluación de la eficiencia energética ambiental**

Fuente: Elaboración propia.

En distintos colores se pueden observar las grandes temáticas involucradas en el proyecto y sus módulos específicos. Los resultados de las calibraciones y aplicaciones de cada uno de estos sub-modelos se presentan en los distintos artículos mencionados anteriormente. Sin embargo, a continuación se presenta una breve descripción de cada uno de ellos.

3.1 Sub-modelo demográfico y de localización de actividades (Demógraf-Econógraf)

- El modelo demográfico es un modelo del tipo cohorte, que incluye un modelo gravitacional de cambio residencial. Ambos modelos se calibra para el período 1991-2001, con información proveniente del Instituto Nacional de Estadística, referente a población por rango de edad (quinquenios) y género. Los coeficientes que se calibran son los incluidos en el modelo gravitacional de cambio residencial (atractividad y fricción del espacio, representado por tiempo de viaje) y se utiliza un método de optimización (minimización del error cuadrático medio).

- Localización de la vivienda: el modelo se basa en la creación de los hogares como un elemento estructural de la demanda de vivienda. Para ello, a la población predicha por el modelo demógraf-econógraf se le aplica una tasa de principalidad por rango de edad, en el entendido que el principal es el promotor de un hogar, que en definitiva es la unidad que demanda vivienda. Las tasas son calculadas a partir de información del censo para los años 1991 y 2001.

- Localización de empleos: a la población localizada se le aplica una tasa de ocupación por rango de edad, con lo que se obtiene la población ocupada residente en cada municipio. A esta población ocupada residente se le aplica un modelo gravitacional acotado en origen, con el fin de predecir los lugares de trabajo localizados (en destino) por parte de la población autóctona.

- Por otra parte, la ubicación de los lugares de trabajo que requiere la economía resulta de la aplicación del modelo espacial de Krugman de comportamiento de las actividades económicas, para el cual se calibran los parámetros de las tendencias centrípetas y centrífugas de los empleos. Finalmente, el total de empleos se proyecta en base a escenarios de Producto Interior Bruto (en adelante, PIB) y productividad, y se distribuyen en el territorio en base al modelo de Krugman. De la comparación entre los empleos del modelo de Krugman y los empleos de la población autóctona (luego de viajar del hogar al trabajo por el modelo gravitacional), surge la necesidad de empleos inmigrantes con lo que se aumentan la población autóctona. Este modelo considera como parámetros la tasa de crecimiento del PIB y la tasa de productividad de los empleos. Los coeficientes requeridos por el modelo de Krugman (atracción, repulsión y fricción del espacio, representada por el tiempo de viaje entre zonas) se calibran con información del censo para los años 1991 y 2009, referente a número de empleos localizados por municipio, y se utiliza el método de optimización (minimización del error cuadrado medio).

Véase el desarrollo completo en el artículo "*Modelo Demógraf-Econógraf sobre la prospectiva demográfica, necesidad de vivienda, y empleo*", de este mismo número monográfico.

3.2 Sub-modelo de transporte (SIMCAT)

- Modelo de distribución de viajes (matrices de viajes): dada la localización de la población ocupada residente y los empleos, se aplica un modelo del tipo factor de crecimiento (factor de promedio), con una matriz inicial. La plataforma utilizada para ello es SIMCAT, un modelo ya

existente y calibrado para Barcelona, que fue utilizado en la evaluación de los planes de infraestructura en la RMB.

- Modelo de asignación: la matriz de viajes actualizada se asigna a la red de transporte, en base al método DUE (del tipo flujo demora). Este procedimiento es también parte de la plataforma SIMCAT.

- Red de transporte: considera los distintos escenarios tanto en geometría (trazados) como en el nivel de servicio (capacidades, peajes, etc.). Para esto se definieron redes para los cortes 2008, 2020 y 2026. La plataforma SIMCAT es la que se utiliza para conformar estas redes.

- Costos de interacción: producto de la asignación de la demanda a la red, se obtienen los flujos por cada arco de la red, así como las emisiones de contaminantes y los gastos de combustibles. Así también se recalculan las matrices de costos de interacción (tiempo) entre las distintas zonas. Por último, esta matriz de costos es la que vuelve a alimentar al modelo de localización de viviendas y de empleo.

Véase el desarrollo completo en el artículo “*SIMCAT: Sistema de Modelización de movilidad y tráfico en Catalunya. Integración al modelo EVALUAMET*”, de este mismo número monográfico.

3.3 Sub-modelo de consumo de suelo (*Evalúaimpact*)

- Superficie construida por actividad económica: el modelo de localización de actividades entrega el número de hogares y empleos (por actividad) en cada zona. Estos lugares de trabajo utilizan una superficie construida, que se determina multiplicando el número de empleos por sus tasas específicas de superficie construida. Estas tasas surgen para el año 2001, a partir de la combinación de información de la base catastral (catastro de edificaciones) y los empleos según censo.

- Modelo de consumo de suelo: este modelo considera las superficies construidas por actividad como variables independientes de un modelo econométrico, cuya variable dependiente es el suelo urbanizado o artificializado. El fenómeno de consumo de suelo se puede ver como un proceso de producción de suelo urbanizado, donde el factor productivo es la superficie construida y el factor producido es el suelo urbanizado que requiere dicha superficie construida. Como modelo de producción, la estructura general está dada por la función *Cobb-Douglas*, que es quizás la más ampliamente utilizada en la economía (siendo la función de producción neoclásica por excelencia). Pero el uso de la función *Cobb-Douglas* como un modelo de consumo de suelo, requiere de una comprensión e interpretación de todos los factores de función, para lograr así la coherencia con el fenómeno analizado. Es por esto que el factor constante, que representa la tasa de transformación de entradas a salidas en el modelo original, se sustituye por un término más complejo (ya no es constante) que refleja las diferentes estructuras de las actividades en cada zona. El término exponencial se debe interpretar como la tasa unitaria de producción de suelo urbanizado (consumo natural del suelo). Asimismo, los coeficientes representan el efecto de cada actividad en dicha tasa. La información para la calibración de este modelo proviene del catastro para la superficie construida por actividades, y de un procesamiento de imágenes satelitales para el suelo

urbanizado. La calibración del modelo se realizó en la plataforma SPSS, con un previo análisis exploratorio espacial en la plataforma GEODA.

Véase el artículo “*Modelo Evalúaimpact, sobre la evaluación de planes y proyectos en la dimensión de eficiencia energética y ambiental del modelo Evaluamet*”, para este y los siguientes modelos.

3.4 Sub-modelo de consumo energético (Evalúaimpact)

- El consumo de energía en el transporte: la aplicación del modelo de transporte arroja como salida el consumo de combustible de todo el sistema. La plataforma SIMCAT ya incorpora estos cálculos, los cuales son especializados en función de las redes que corresponden a cada municipio analizado. Así se tiene la distribución espacial tanto de los flujos como de los consumos de combustibles.

- Sub-modelo de consumo de energía por actividades localizadas: para este modelo sólo se contó con información de consumo de energía eléctrica. Con esto fueron calibrados distintos modelos econométricos, para las distintas actividades de las cuales se contaba con información de consumo (viviendas, oficinas, comercios, industrias, hoteles, etc.). La variable dependiente es siempre el consumo eléctrico anual y las variables explicativas son las superficies construidas por cada actividad, además de otras variables complementarias que tienen relación con las condiciones meteorológicas en el territorio y la duración media diaria de cada actividad (tiempo de trabajo, tiempo de compras, el tiempo de la educación, etc.). El fenómeno del consumo eléctrico también se enfocó como una producción de demanda eléctrica, por lo que nuevamente se calibraron estructuras *Cobb-Douglas*, en la que el factor constante refleja las diferentes estructuras de las actividades en cada área y los coeficientes representan el efecto de cada actividad en el consumo anual de electricidad. La información disponible para la calibración de este modelo fueron las superficies construidas de catastro y los consumos anuales (año 2005) a nivel de municipios, entregado por la distribuidora Fecsa-Endesa (la que tiene una alta participación de mercado en la RMB). La calibración del modelo también se realizó en la plataforma SPSS, con un previo análisis exploratorio espacial en la plataforma GEODA.

3.5 Sub-modelo de emisiones ambientales (Evalúaimpact)

- Emisiones ambientales del transporte: este procedimiento es interno de la plataforma SIMCAT, y considera los distintos flujos y sus tasas de emisión de gases contaminantes CO₂, NOX y PM (que dependen principalmente de la velocidad).

- Emisiones ambientales de las actividades localizadas: este procedimiento consideró el estudio de las cuentas ambientales de Cataluña (Generalitat de Cataluña, 2009), del cual se obtuvieron tasas de emisión anual por empleado de las diversas actividades económicas analizadas y también por las residencias.

3.6 Procedimiento de evaluación de planes

Los sub-modelos antes presentados se integran en un único procedimiento que permite evaluar dos tipos de planes, correspondientes a planes (o proyectos) de transporte y planes (o proyectos) de ordenamiento de actividades. Para lo anterior se definió la situación base contra la cual comparar, la que corresponde a la localización de población y actividades económicas, flujo y costos del sistema de transporte, estructura de consumo eléctrico y de emisiones ambientales, y patrón de consumo de suelo (suelo artificializado), para los años 2009, 2014, 2019, 2024.

La secuencia que sigue la evaluación de un plan de transporte u ordenamiento es la siguiente:

Paso 1. La implementación de un plan de transporte modifica la estructura de los costos de interacción de la red de transporte, por lo que se actualiza dicha matriz. La implementación de un plan de ordenamiento de actividades modifica la distribución de los empleos totales, por lo que se altera el atractivo laboral de los territorios.

Paso 2. Para las nuevas condiciones, se aplica el modelo de localización de actividades con las nuevas matrices de costos de interacción y de atractivo laboral de los territorios. Producto de esto se tendrá un nuevo vector de empleos totales por municipio. La comparación de esta nueva situación con la situación base se debe interpretar no en su valor absoluto, sino que como una *tendencia* de relocalización de empleos, producto de la implementación del plan. Esta tendencia tiene la ventaja que identifica los municipios que verán aumentado su número de empleos, pero también los que disminuyen sus empleados totales, por lo que surgen los efectos diferenciados totales del plan en el territorio. Al variar los empleos totales varían los empleos por actividad, con lo que también varía la superficie construida por actividad. Nuevamente es necesario aclarar que el resultado del modelo puede indicar que una determinada superficie de techo disminuye (se destruye), lo que no debe ser interpretado en forma literal sino más bien como una tendencia de presión y inmobiliaria (aumento y disminución).

Paso 3. Con los nuevos valores de población y empleo se aplica el modelo de transporte para determinar los nuevos valores de flujo en la red.

Paso 4. Con los nuevos valores de superficie de techo por actividad se alimenta el modelo de consumo de suelo, del que se obtiene el efecto en el suelo artificializado, tanto en el aumento como en la tendencia de disminución (que se puede interpretar como una pérdida de presión o interés en dichos municipios).

Paso 5. Con los nuevos valores de superficie de techo y suelo artificializado se alimentan los distintos modelos, obteniéndose los nuevos valores de consumo eléctrico por actividad y total. Por otra parte, con los nuevos valores de flujo en la red de transporte se calculan los nuevos valores de consumo energético y de combustible.

Paso 6. Con los nuevos valores de superficie de techo se calculan los nuevos valores de emisiones ambientales por actividad y los totales. Con los nuevos valores de flujo en la red de transporte se calculan los nuevos valores de emisiones ambientales en la red.

Paso 7. Con los nuevos valores en todas las dimensiones analizadas se recalculan los indicadores sintéticos de eficiencia espacial, concluyendo respecto de los efectos de los planes evaluados.

4. Consideraciones finales respecto del diseño general y el acoplamiento funcional del modelo

El modelo presentado (EVALÚAMET) se ha hecho operativo en un procedimiento que relaciona tres plataformas computacionales. Esto es, a SIMCAT (plataforma ya existente para Cataluña) se ha asociado la plataforma DEMÓGRAF-ECONÓGRAF (que comprende el modelo de proyección demográfica y localización de actividades) y la plataforma EVALÚAIMPACT (que comprende el modelo de externalidades ambientales y sociales).

Con base en el trabajo realizado en la construcción, calibración y aplicación del modelo en la evaluación de proyectos específicos, se pueden plantear los siguientes comentarios finales:

- El diseño final del modelo se ha adecuado a la disponibilidad de información, tanto en su escala espacial como temporal. Así, la información de base del modelo condiciona la interpretación de sus resultados, tanto en términos de interpolación espacial como en términos de extrapolación temporal. Por otra parte, la relativa generalidad de la información utilizada (fuentes) hace factible la replicación del modelo en otras realidades territoriales, así como también la actualización de los parámetros y coeficientes calibrados.
- Una condición importante desde un principio fue la necesidad de mantener una coherencia mínima en todo el procedimiento de cálculo. Esta coherencia se refiere a las escalas y complejidad de los distintos sub-modelos implementados. Esto quiere decir que se utilizaron técnicas pertinentes en cada tema, pero no las más complejas ni avanzadas, ya que el valor de la propuesta es la integración entre las distintas temáticas involucradas a través de las entradas y salidas entre ellos. Esta premisa tiene la ventaja de poner en valor la integración, pero la desventaja de perder precisión o exactitud en cada una de las temáticas analizadas. En todo caso, si posteriormente se ve la utilidad y necesidad, dada la modularidad del modelo, se podrían desarrollar modelos específicos más complejos, en pos de mejorar la representación de cada variable o externalidad.
- Los modelos y sub-modelos implementados presentan, en general, un buen desempeño. Si bien los errores son significativos en algunos casos, necesariamente la aplicación del modelo debe ser para evaluar el efecto diferencial de la situación con y sin proyecto, eliminando así el error de la estimación absoluta, dándole una mayor validez a la medición del efecto específico de un proyecto o plan.
- Los resultados numéricos de cada una de las etapas del modelo no deben ser interpretados de manera absoluta, dado que el objetivo original no es la predicción. Además está el hecho de que cada variable puede aumentar o disminuir, lo que en la práctica no sucederá (no se destruye superficie construida o suelo urbanizado). Entonces, los resultados deben ser

considerados como una tendencia de comportamiento, que genera una situación más o menos eficiente (sustentable) que la situación base.

- Consideradas las limitaciones anteriores, las aplicaciones del modelo pueden ser muy variadas y útiles en la medida que ponen de manifiesto los efectos tradicionalmente conocidos como indirectos (sistémicos) de los proyectos. Así se amplía la posibilidad de una gestión no sectorial, en el sentido que un problema específico puede ser resuelto por otra dimensión de política sectorial. Es en este sentido que se materializa el concepto de *gestión de un sistema territorial*.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer la ayuda recibida del Ministerio de Fomento (gestionada por el actual Ministerio de Economía y Competitividad, MINECO) E80/08 “Modelo de evaluación de la eficiencia energética y ambiental, de la movilidad y la estructura de usos de suelo, para la región metropolitana de Barcelona *Evaluamet*”. Proyecto del cual se desprende el presente documento. También quieren agradecer a los colaboradores que han aportado a este desarrollo, como son: Carlos Aguirre, Manuel Ruiz Lineros, Claudia Pérez, Yraida Romano y María Concepción Crespo.

Bibliografía

ALONSO, W. *Location and Land Use*. 1964, Harvard university press, Boston

AUTORITAT del Transport Metropolità. *Pla Director d'Infraestructures de la regió metropolitana de Barcelona 2001-2010, Memòria actualitzada*. [en línea] Fecha de consulta: 02-08-2009. Disponible en: <http://www.atm.cat/web/pdf/altres/PDI_2001-2010_juliol_09.pdf>. 2009.

BANCO Interamericano de Desarrollo. *Manual de Evaluación Económica de Proyectos de Transporte* [en línea] Fecha de consulta: 02-04-2010. Disponible en: <<http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=1037792>>. 2006.

BAKER, W. L. *A review of models of landscape change*. En: *Landscape Ecology*, 2 (2): 111-133, 1989.

CATALINA, T. et al. *Development and validation of regresion models to predict monthly heating demand for residential buildings*. En: *Energy Build*, 40 (10): 1825-1832, 2008.

CERDA, J. y MARMOLEJO, C. *The use of the city in space and time as a new social approach for the prioritising transport corridors in the metropolitan area of Barcelona (Spain)*. En: BREBIA, C.A. *The Sustainable World*. Southampton (UK), WIT Press, 2011, pp: 459-468. ISBN 978-1-84564-504-5.

CHEN, S. et al. *A statistical method to investigate national energy consumption in the residential building sector of China*. En: *Energy Build*, 40 (4): 654-665, 2008.

COMISION de las comunidades europeas. *Comunicación de la comisión al consejo y al parlamento Europeo Relativa a la revisión de la estrategia para un desarrollo sostenible Plataforma de acción*. Bruselas. [en línea] Fecha de consulta: 02-04-2012. Disponible en: < <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2005:0658:FIN:ES:PDF>>. 2005

CONSEJO de Europa. *Convenio Europeo del paisaje*. Florencia. [en línea] Fecha de consulta: 02-04-2012. Disponible en: < <http://www.cidce.org/pdf/Convenio%20Paisaje.pdf>>. 2000

GENERALITAT de Catalunya . *El compte satèl·lit de les emissions atmosfèriques a Catalunya 2001*. [en línea] Fecha de consulta: 02-04-2012. Disponible en: <<http://www.idescat.cat/cat/idescat/publicacions/cataleg/pdfdocs/csea2001.pdf>>. 2009

HEIPLE, S. y SAILOR, D.J. *Using building energy simulation and geospatial modeling techniques to determine high resolution building sector energy consumption profiles*. En: *Energy Build*, 40 (8): 1426-1436, 2008.

HUNT, J.D. et al. *Current Operacional Urban Land-use-transport Modelling Frameworks: a review*. En: *Transport Reviews*, 25 (3): 329-376, 2005.

INFANTE, J.M. *Modelo de estimación espacial de consumos eléctricos para la planificación de la expansión de sistemas de distribución. Documento de investigación* [en línea] Fecha de consulta: 02-04-2012. Disponible en: <http://146.83.6.25/literatura/sistemas_potencia/ModeloEstimacionConsumo.pdf>. 2006.

KAIMOWITZ, D. y ANGELSEN, A. *Economic Models of Tropical deforestation*. Malaysia, A Review Center for International Forestry Research, 1998. 305 p.

KIKEGAWA, Y. et al. *Impacts of city-block-scale countermeasures against urban heat-island phenomena upon a building's energy-consumption for air-conditioning*. En: *Energy Build*, 83 (6): 649-668, 2006.

LAMBIN, E. *Modelling Deforestation Processss, A Review*. Oceans, European Commission, Institute for Remote Sensing Aplications, European Space Agency, 1994. 113 p.

ORTÚZAR, J.D. *Modelos de demanda de transporte*. Santiago de Chile, Ediciones Universidad Católica de Chile, 1998. 247 p.

PARKS, L. y PETERS, R. *Models of Forested and agricultural Landscape. Integrating Economics. Quantitative Methodes in Landscape Ecology*. En: *Springer - Verlag*, 12: 309-322, 1990.

POZUETA, J. *Movilidad y planeamiento sostenible: Hacia una consideración inteligente del transporte y la movilidad en el planeamiento y el diseño urbano*. Red de cuadernos de investigación urbanística. Madrid, Instituto Juan Herrera ed., 2000. 97 p.

RATTI, C. et al. *Energy consumption and urban texture*. En: Energy Build, 37 (7): 762-776, 2005.

RUEDA, S. *Modelos de ordenación del territorio más sostenible*. [en línea] Fecha de consulta: 02-04-2010. Disponible en: <<http://habitat.aq.upm.es/boletin/n32/asrue.html>>. 2003.

SAILOR, D.J. y LU, L. *A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas*. En: Atmos.Environ, 38 (17): 2737-2748, 2004.

SANTANDER, M. *Desarrollo de un inventario de emisiones biogénicas y geogénicas aplicado a la Región de O'Higgins* [en línea] Fecha de consulta: 02-04-2012. Disponible en: <http://www.digeo.cl/doc/Santander_Jofre_Mario.pdf>. 2005.

SECTRA, Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones del Gobierno de Chile. *Análisis del Equilibrio Económico en el Mercado Inmobiliario (MUSSA)* [en línea] Fecha de consulta: 02-04-2009. Disponible en: <http://www.sectra.gob.cl/Metodologias_y_Herramientas_de_Transporte/metodologia/mussa.html>. 2002.

SHUGAR, H. y SEAGLE, S. *Modeling Forest Landscape and role of disturbance in ecosystems and communities*. En: The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics, Academic press : 353-358, 1986.

TRAVISI, C. et al. *Analysis of environmental costs of mobility due to Urban Sprawl – A Modelling Study on Italian Cities*. Discussion Paper [en línea] Fecha de consulta: 02-04-2010. Disponible en: <http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=901180>. 2006.

YAMAGUCHI, Y. et al. *Proposal of a modeling approach considering urban form for evaluation of city level energy management*. En: Energy Build, 39 (5): 580-592, 2007a.

YAMAGUCHI, Y. et al. *Transition to a sustainable urban energy system from a long-term perspective: Case study in a Japanese business district*. En: Energy Build, 39 (1): 1-12, 2007b.