

Doctorado en Sostenibilidad – Plan de Investigación

**LA DIVERSIDAD EN EL CONTEXTO URBANO COMO
MEDIDA DE LA SOSTENIBILIDAD. APROXIMACIÓN AL
ANÁLISIS DE LA CIUDAD DESDE LA CIENCIA DE LOS
SISTEMAS COMPLEJOS Y LA ECOLOGÍA URBANA**

Lorena Salazar Llano

Directores:

María Isabel Ortego Martínez, PhD.

Martí Rosas Casals, PhD.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	3
INDICE DE TABLAS	4
INDICE DE FIGURAS	5
1 INTRODUCCIÓN	6
1.1 PROBLEMÁTICA Y OPORTUNIDADES DE LAS CIUDADES	6
2 ESTADO DEL ARTE	7
2.1 LA SOSTENIBILIDAD EN EL CONTEXTO URBANO	7
2.2 EL CONCEPTO DE CIUDAD DESDE LA ECOLOGÍA URBANA	7
2.2.1 ESTRUCTURA DEL ECOSISTEMA URBANO	9
2.2.2 METABOLISMO URBANO	10
2.3 LA DIVERSIDAD COMO MEDIDA DEL SISTEMA URBANO	11
2.3.1 LA ENTROPÍA COMO MEDIDA DE DIVERSIDAD URBANA	12
2.3.1.1 ENTROPÍA Y DIVERSIDAD EN CUATRO DISTRITOS DE BARCELONA	13
3 ESTADO DE LA INVESTIGACIÓN	20
3.1 LA DIVERSIDAD DE BARCELONA, UNA APROXIMACIÓN A PARTIR DEL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	20
3.1.1 SISTEMA DE INDICADORES PARA CADA CATEGORÍA METABÓLICA	20
3.1.2 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	23
3.1.3 COMPONENTE 1: FONDO SOCIAL – DIVERSIDAD DE USOS	24
3.1.4 COMPONENTE 2: FONDO ECOLÓGICO	25
3.1.5 COMPONENTE 3: FONDO ESTRUCTURAL / FORMAL	25
3.1.6 DIVERSIDAD METABÓLICA	26
4 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS	27
4.1 OBJETIVO GENERAL	27
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
5 METODOLOGÍA	28
5.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA	28
5.2 CASO DE ESTUDIO	28
6 PLAN DE INVESTIGACIÓN Y CONTRIBUCIONES ESPERADAS	30
7 REFERENCIAS	31

RESUMEN

En las últimas seis décadas el planeta ha experimentado un proceso acelerado de urbanización, se estima que para el 2050 el 66% de la población sea urbana. La creciente urbanización ha traído consigo importantes impactos económicos, sociales y ambientales. Por otra parte, las ciudades han sido identificadas como centros de desarrollo económico, transformación cultural, creatividad, productividad e innovación tecnológica. Si se lleva a cabo una adecuada gestión, las ciudades pueden y tendrán que desempeñar un papel crítico para alcanzar el desarrollo sostenible en las escalas regional y global.

Desde la ecología urbana se han propuesto diferentes indicadores y conceptos para el análisis, la planeación y la gestión de ciudades sostenibles. La ecología urbana permite estudiar las ciudades como sistemas socioecológicos adaptativos, complejos, dinámicos, heterogéneos, caracterizados por la diversidad de sus individuos y por las múltiples interacciones entre las distintas escalas. En este contexto, se introduce el concepto de ecosistema urbano para hacer una lectura de ciudad que permite incluir conceptos ecológicos para el diagnóstico y la gestión urbana. Recientemente el estudio de las ciudades se ha venido transformando desde la ciencia de los sistemas complejos. El concepto de diversidad se ha empleado como propiedad de los sistemas complejos y en el ámbito de la ecología como un indicador descriptivo del ecosistema. Se ha sugerido que la diversidad está asociada a la complejidad del sistema y por consiguiente a su robustez. Sin embargo los debates diversidad-robustez y complejidad-sostenibilidad están abiertos debido a la amplitud del concepto de diversidad y a las variadas medidas que la cuantifican. Particularmente, en el contexto urbano se ha empleado la entropía de la información como medida de la diversidad morfológica, la diversidad de usos y la diversidad metabólica, dichas medidas han estudiado los elementos del sistema urbano de forma independiente.

Por lo tanto, en este plan de investigación se plantea como objetivo desarrollar una medida de la diversidad que describa la complejidad del ecosistema urbano y permita valorar su robustez. Esta medida contemplaría el análisis temporal del desarrollo urbano, de su metabolismo y de su diversidad funcional. Para ello se propone la aplicación de una medida de diversidad en el análisis del ecosistema urbano partiendo de métodos matemáticos como la entropía de la información (Shannon, 1948) la diversidad de Wietzman (Page, 2011), el método de máxima entropía (Harte, 2011) y el análisis de componentes principales. Se espera que dicho análisis aporte argumentos en los debates de diversidad-robustez y complejidad-sostenibilidad.

Se describe la metodología y el plan de trabajo propuestos para conseguir los objetivos planteados y se presentan los resultados de una primera aproximación a la diversidad de Barcelona a partir del análisis de componentes principales en los distritos de Ciutat Vella, Eixample, Les Corts y Gracia.

Palabras claves: diversidad, ecología urbana, sostenibilidad, sistemas complejos.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Principales enfoques de la ecología urbana.....	8
Tabla 2: Categorías e Indicadores empleados en el cálculo de la entropía como medida de la diversidad metabólica.	17
Tabla 3: Valores del sistema de indicadores para el distrito Ciutat Vella entre 2003 y 2013.....	20
Tabla 4: Valores del sistema de indicadores para el distrito Eixample entre 2003 y 2013....	21
Tabla 5: Valores del sistema de indicadores para el distrito de Les Corts entre 2003 y 2013.....	22
Tabla 6: Valores del sistema de indicadores para el distrito de Gracia entre 2003 y 2013...	23

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Relaciones entre los componentes del ecosistema urbano..	9
Figura 2: Principales flujos entre el ecosistema urbano y el entorno.	10
Figura 3: Índice de diversidad urbana en Ciutat vella, Eixample, Les Corts y Gracia.....	14
Figura 4: Histograma de frecuencias del Índice de diversidad urbana para cada distrito. ...	15
Figura 5: Resultados del cálculo de la entropía urbana para cada distrito.....	16
Figura 6: Resultados del cálculo de la entropía del Metabolismo de Soporte de entrada ($\Delta eS1$) para los distritos de Ciutat Vella, Eixample, Les Corts y Gracia.	18
Figura 7: Resultados del cálculo de la entropía del Metabolismo de Presión de salida ($\Delta eS2$) para los distritos de Ciutat Vella, Eixample, Les Corts y Gracia.	18
Figura 8: Resultados del cálculo de la entropía del Metabolismo Destructivo ($\Delta iS2$) para los distritos de Ciutat Vella, Eixample, Les Corts y Gracia.	19
Figura 9: Resultados del cálculo de la entropía del Metabolismo Regenerativo ($\Delta iS1$) para los distritos de Ciutat Vella, Eixample, Les Corts y Gracia.....	19
Figura 10: Resultados del análisis de componentes principales. Gráfica biplot (individuos y variables) de las componentes principales 1 y 2.	24
Figura 11: Resultados del análisis de componentes principales. Gráfica biplot (individuos y variables) de las componentes principales 2 y 3.	25
Figura 12: Resultados del análisis de componentes principales. Gráfica biplot (individuos y variables) de las componentes principales 1 y 3.	26
Figura 13: Mapa del área de estudio..	29

1 INTRODUCCIÓN

1.1 PROBLEMÁTICA Y OPORTUNIDADES DE LAS CIUDADES

En las últimas seis décadas el planeta ha experimentado un proceso acelerado de urbanización, actualmente el 54% de la población vive en áreas urbanas y se espera que para el 2050 este porcentaje sea del 66%. La población urbana mundial actualmente es de 3,9 billones aproximadamente y se espera que alcance los 6,3 billones en 2050. El 90% del incremento esperado para 2050 tendrá lugar en las áreas urbanas de países en desarrollo de África y Asia (United Nations Population Division, 2014).

La creciente urbanización, en muchos casos no planificada, ha traído consigo importantes impactos económicos, sociales y ambientales, escasamente comprendidos, que han generado problemas de escala global como el cambio climático y crisis locales relacionadas con la disponibilidad de recursos y servicios básicos como; energía, agua, salud y alimentación. Por otra parte, las ciudades han sido identificadas como centros de desarrollo económico, transformación cultural, creatividad, productividad e innovación tecnológica (Luis M a Bettencourt & West, 2010; Wu, 2014).

Si se lleva a cabo una adecuada gestión urbana; las ciudades representan oportunidades para el desarrollo económico, para la mitigación del cambio climático y para abastecer de servicios e infraestructuras de salud y educación a un gran parte de la población. En este sentido, las ciudades pueden y tendrán que desempeñar un papel crítico para alcanzar el desarrollo sostenible en las escalas regional y global. Para asegurar que las ciudades contribuyan al desarrollo sostenible, es necesario entender y predecir las dinámicas e interacciones entre la sociedad y el medio ambiente, resultantes del proceso de urbanización. Los sistemas urbanos deben ser objeto de investigación para contribuir a una mejor definición de la reciente ciencia de las ciudades (Batty, 2012; Lu'is M a Bettencourt & West, 2010; L. M. A. Bettencourt, Lobo, Helbing, Ku, & West, 2007).

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 LA SOSTENIBILIDAD EN EL CONTEXTO URBANO

La Organización de Naciones Unidas ha definido la sostenibilidad como un proceso global de desarrollo que minimiza los recursos ambientes y reduce el impacto en los sumideros ambientales, haciendo uso de procesos que mejoran simultáneamente la economía y la calidad de vida (United Nations, 1987). Con respecto al concepto de sostenibilidad en el marco de la ciudad, algunos autores afirman que este concepto es un recurso formal y un mecanismo de cohabitación entre crecimiento urbano y desarrollo ilimitado con algunas disminuciones no sustanciales, por lo cual en un contexto exclusivamente urbanístico este concepto debe ser debatido.

Aunque el concepto de sostenibilidad en el ecosistema urbano puede ser cuestionada debido a la naturaleza disipativa de las ciudades, desde diferentes enfoques algunos autores han propuesto estrategias y conceptos para el análisis, la planeación y la gestión de ciudades “sostenibles”. En la literatura sobre sostenibilidad urbana se desarrolla ampliamente el análisis de la ciudad como ecosistema con el objetivo de resolver los problemas ambientales, que en su mayoría están relacionados con el crecimiento de las entradas (inputs) y la gestión de los residuos en aumento (outputs). Este enfoque ecosistémico permite concebir los sistemas de gestión y las tecnologías para la reintegración de los procesos naturales, el aumento de la eficiencia en el uso de recursos, el reciclaje de los residuos y la conservación e incluso producción de energía (Christopher Kennedy, Cuddihy, & Engel-yan, 2007; Newman, 1999).

Desde este enfoque diversos autores han empleado el concepto de metabolismo urbano como herramienta de análisis de las problemáticas urbanas asociadas a los diferentes flujos metabólicos (C. Kennedy, Pincetl, & Bunje, 2011; Newman, 1999; Zhang, Yang, Fath, & Li, 2010). En el análisis metabólico, Newman (1999) señala la importancia de incluir el concepto de habitabilidad urbana con el fin de asegurar los aspectos económicos y sociales del desarrollo sostenible y desarrollar una adecuada planificación urbana. Para ello considera algunas medidas de habitabilidad en lo que denomina el modelo metabólico extendido, el cual incluye indicadores de salud, empleo, ingresos, educación, calidad de la vivienda, esparcimiento y actividades comunitarias.

En términos estructurales el urbanismo bioclimático da respuestas formales a los retos de eficiencia, sostenibilidad y calidad de vida en las ciudades (Higueras, 1998). Por otra parte, la Agencia de Ecología Urbana de Barcelona (AEUB) (2010b) asegura que el aumento en la diversidad y complejidad urbana, responden a un modelo sostenible que asegura la estabilidad del sistema. La AEUB propone un modelo urbano sostenible que incorpora el aumento en la organización urbana y la reducción de la presión ejercida por el sistema urbano. Este modelo tiene base teórica en el principio de Margalef, que postula que el mantenimiento y/o aumento de la complejidad de un espacio ocupado por un sistema se desarrolla a costa de la simplificación de otros espacios, lo que implica un flujo direccionado desde el espacio menos complejo hacia el mas complejo. Una mayor complejidad y diversidad del ecosistema urbano implica un aumento en la información, una mejor capacidad de respuesta al cambio y por consiguiente aseguran la estabilidad del sistema (Margalef, 1991).

2.2 EL CONCEPTO DE CIUDAD DESDE LA ECOLOGÍA URBANA

Desde la ecología urbana se han propuesto diferentes indicadores y conceptos para el análisis, la planeación y la gestión de ciudades sostenibles. La ecología urbana integra

teorías y métodos de las ciencias naturales y sociales para estudiar las interacciones y procesos que caracterizan el sistema urbano. Concretamente, la ecología urbana puede definirse como el estudio de los patrones espacio-temporales, de los impactos ambientales y de la sostenibilidad del proceso de urbanización con énfasis en la biodiversidad y en los procesos y servicios ecosistémicos (Wu, 2014). Desde la ecología urbana se hace una aproximación multidisciplinar a la investigación urbana que incluye diferentes campos de las ciencias sociales y naturales; la sociología urbana, la geografía, la ecología humana, la teoría de los sistemas complejos y la planificación urbana y regional.

Se han identificado tres perspectivas en la ecología urbana. La primera hace referencia a la **ecología en las ciudades**; que se centra principalmente en los organismos vivos diferentes al ser humano que habitan el ambiente urbano. La segunda hace referencia a la **ecología de las ciudades**; que considera la ciudad en su totalidad como un ecosistema. Y la última hace referencia a la **sostenibilidad de las ciudades**, tema ampliamente desarrollado en los últimos años en la literatura sobre estudios urbanos. En base a esta categorización se han identificado cinco enfoques principales, que se muestran a continuación en la Tabla 1.

Enfoque basado en la ecología humana o sociología urbana .	Investiga el comportamiento humano y la organización social en las ciudades basado en las teorías y los conceptos provenientes de la ecología.
Enfoque bio-ecológico	Se centra en la distribución y abundancia de plantas y animales al interior y alrededor de los sistemas urbanos.
Enfoque de los sistemas urbanos o enfoque del ecosistema humano	Estudia la ciudad como todo un ecosistema formado por dos componentes; natural y socioeconómico.
Enfoque del paisaje urbano	Estudia las ciudades como áreas espacialmente heterogéneas, basado en principios y métodos en ecología del paisaje. Este enfoque se centra en la relación entre los patrones de urbanización y los procesos ecológicos.
Enfoque en sostenibilidad urbana .	Estudia las ciudades como sistemas humano-ambientales o sistemas socio-ecológicos, con énfasis en la relación entre los servicios ecosistémicos y el bienestar humano.

Tabla 1: Principales enfoques de la ecología urbana. Fuente: Elaboración propia a partir de (Wu, 2014).

La ecología urbana permite estudiar las ciudades como sistemas socioecológicos adaptativos, complejos, dinámicos, heterogéneos, caracterizados por la diversidad de sus individuos y por las múltiples interacciones entre las distintas escalas (Grimm et al., 2008). La ciudad se considera un ecosistema de alta complejidad, que ha sido concebido por la sociedad urbana estableciendo las relaciones entre sus elementos y responde a un orden que difiere del ecosistema natural. La ciudad representa un sistema abierto, cuyo desarrollo es un proceso dinámico que implica utilización de materia, energía e información para su desarrollo y sostenimiento. Según Wu (2014) un sistema urbano es un paisaje espacialmente heterogéneo cuya estructura, función y dinámica están determinadas por las interacciones entre los seres humanos y el medio ambiente. Los sistemas urbanos son sistemas complejos y adaptativos, que se caracterizan por; componentes altamente diversos, heterogeneidad espacial, respuestas no lineales, interacciones multi-escala y capacidad de auto-ajuste en respuesta a los cambios. En este contexto, se introduce el concepto de ecosistema urbano para hacer una lectura de ciudad que permite incluir conceptos ecológicos como: **diversidad**, flujos de materia, flujos de energía, dinámicas poblacionales y territorialidad, entre otros, para el diagnóstico y la gestión urbana.

En el rápido proceso de urbanización, las ciudades han crecido lejos de su dependencia en los territorios circundantes, aumentando su huella ecológica. La huella ecológica de una ciudad es la cantidad de área biológicamente productiva requerida para proveer sus recursos naturales y asimilar sus residuos (Christopher Kennedy et al., 2007). El subsistema socioeconómico depende de las capacidades productiva y de regeneración de los

ecosistemas que se encuentran más allá de la huella ecológica límite, que puede ser de diez a cien veces el área ocupada por la ciudad, para producir los flujos de energía, materiales y servicios ambientales que sustentan el bienestar y la calidad de vida (Grimm et al., 2008). En este sentido, un sistema urbano sólo puede ser interpretado como un sistema completo, si se consideran íntegramente incluidas en él las zonas de influencia, de donde obtiene las entradas (inputs) y donde libera las salidas (outputs). Como la ciudad no tiene una ecología separada de su entorno, la gestión de la ciudad como ecosistema quedará en teoría hasta que no se rompa la dicotomía urbano/rural (Bettini, 1998).

2.2.1 ESTRUCTURA DEL ECOSISTEMA URBANO

La estructura del ecosistema urbano puede dividirse en los subsistemas social, económico y ecológico. Los subsistemas social y económico se pueden agrupar en el subsistema socioeconómico, el cual está ligado a la generación de entropía (desorden) en el sistema. La absorción de la desorganización está a cargo del subsistema natural, que representa la capacidad de carga del ecosistema urbano. En la Figura 1 se observan las relaciones entre los diferentes componentes del ecosistema urbano.

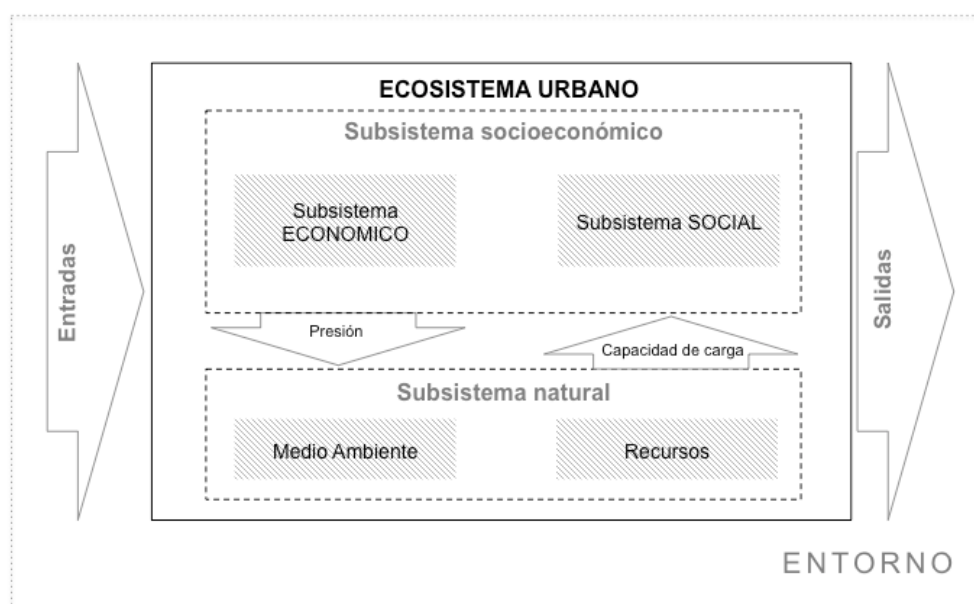


Figura 1: Relaciones entre los componentes del ecosistema urbano. Fuente: Elaboración propia.

El sistema contempla distintos flujos entre el ecosistema urbano y el entorno (Figura 2). Estos flujos hacen referencia a; energía, materia e información. La estructura del ecosistema urbano tiene en cuenta los siguientes elementos; productores, consumidores y regeneradores (Lin & Xia, 2013; Zhang, Yang, & Li, 2006). Los productores de materia están constituidos por la agricultura, la silvicultura, la ganadería y los recursos minerales. Los productores de energía están constituidos por; los recursos minerales, la morfología del suelo y las fuentes energéticas. Los productores de información son principalmente las instituciones, esta información está concebida como el conocimiento humano acumulado en distintos tópicos como la ciencia, la cultura, la legislación y la técnica, entre otros. Entre las instituciones productoras se encuentran; instituciones académicas, gubernamentales, técnicas y culturales.

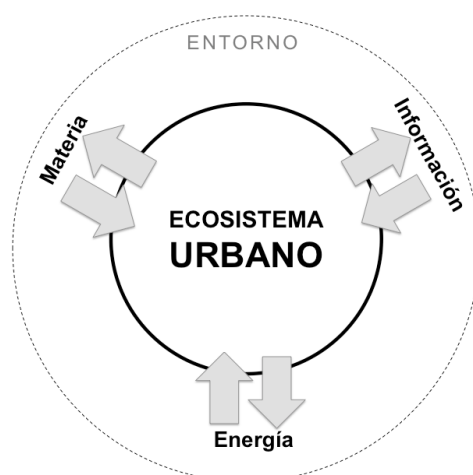


Figura 2: Principales flujos entre el ecosistema urbano y el entorno. Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, los consumidores de materia, energía e información son los individuos y entidades del subsistema socioeconómico. Estos consumidores ejercen el mecanismo disipativo que absorbe y transforma la materia, energía e información, es decir, ejercen presión sobre el subsistema natural. Los regeneradores de materia, energía e información están relacionados con la recuperación, la correcta eliminación y reutilización de residuos. El principal componente regenerador es el subsistema natural, que representa la construcción ecológica asociada a una entropía negativa en términos energéticos.

2.2.2 METABOLISMO URBANO

En el marco de la ecología urbana se desarrolla el concepto de metabolismo urbano como método de análisis a través de la cuantificación de los flujos de materia, energía e información, propios de los sistemas urbanos. Este método de análisis permite identificar el nivel de orden y desarrollo del ecosistema urbano. Abel Wolman (1965) introduce este concepto al analizar el metabolismo de una ciudad hipotética estadounidense de 1 millón de habitantes. Tras cuantificar los flujos globales de energía, agua, materiales y residuos dentro y fuera del área urbana, identificó los principales retos que enfrenta una región urbana; gestión del suministro de agua, evacuación de las aguas residuales y la contaminación del aire.

El metabolismo urbano se define como la totalidad de procesos técnicos y socioeconómicos que tienen lugar en las ciudades y contextos urbanos, y que tienen consecuencias en el crecimiento, la producción energética y la eliminación de los residuos de las mismas. El concepto de metabolismo urbano hace una analogía entre la ciudad y un organismo, que toma los recursos y nutrientes requeridos y libera residuos al medio ambiente. Esta analogía es de gran utilidad en la cuantificación de las tendencias longitudinales en el consumo y la generación de residuos en las ciudades en crecimiento (Grimm et al., 2008).

El metabolismo urbano se puede clasificar en metabolismo disipativo y en metabolismo reductivo. El metabolismo disipativo ocurre cuando el sistema libera materiales y energía al medio ambiente, aumentando su nivel de entropía. Por el contrario, el metabolismo reductivo ocurre cuando se almacenan materiales o energía en el sistema, disminuyendo su entropía global. La producción de entropía se puede emplear para evaluar el nivel metabólico del sistema. Cuando la entropía producida por el metabolismo reductivo es mayor a la entropía producida por el metabolismo disipativo, la dirección del desarrollo del ecosistema urbano es hacia la estabilidad y el orden; es decir, el ecosistema está en proceso de maduración. De lo contrario, el ecosistema se desarrolla hacia la inestabilidad, el desorden y el desequilibrio, es decir, el ecosistema está en degradación. Cuando la

entropía producida por el metabolismo disipativo es igual a la entropía producida por el metabolismo reductivo, el ecosistema está en un estado de equilibrio que se asemeja a un ecosistema clímax natural (Zhang et al., 2006).

Debido a la incertidumbre que caracteriza los sistemas urbanos, la trayectoria dinámica de las ciudades no puede ser descrita en su totalidad, pero puede y debería estar influenciada o guiada en dirección hacia la sostenibilidad a través de actividades de planificación y diseño basadas en los principios y conocimientos que aporta la ecología urbana.

En la cuantificación de los flujos materiales y energéticos, los estudios sobre el metabolismo urbano permiten evaluar la dirección de desarrollo de una ciudad y contribuir a su planificación (C. Kennedy et al., 2011; Christopher Kennedy et al., 2007). Los problemas ambientales que experimenta el ecosistema urbano no están relacionados únicamente con la degradación de la naturaleza, son, sobretodo problemáticas asociadas a la falta de gestión de los ciclos energéticos y a la continuidad del modelo de ciudad como sistema altamente disipativo. En este sentido, la investigación sobre el metabolismo urbano puede contribuir a resolver los problemas ambientales, al dejar en evidencia la demanda de recursos del ecosistema urbano y la presión que ejerce este sobre el subsistema natural y el entorno (Zhang, 2013).

2.3 LA DIVERSIDAD COMO MEDIDA DEL SISTEMA URBANO

Recientemente el estudio de las ciudades se ha venido transformando desde la ciencia de los sistemas complejos. Las ciudades son el ejemplo por excelencia de los sistemas complejos; son diversas, presentan fenómenos emergentes y adaptativos, entre otras características. Desde este enfoque se han desarrollado teorías que demuestran el escalamiento de algunas propiedades asociadas al proceso de urbanización y al desarrollo económico en función del tamaño de las ciudades (Arcaute et al., 2015; L. M. A. Bettencourt et al., 2007; Luís M a Bettencourt, 2013). Igualmente se ha estudiado el desarrollo urbano en relación a la escala, la morfología y los patrones de transporte (Batty, 2008).

El concepto de diversidad se ha empleado como propiedad de los sistemas complejos y en el ámbito de la ecología como un indicador descriptivo del ecosistema. Algunos trabajos en teoría de sistemas socioecológicos sostienen que el incremento en la diversidad del sistema mejora su capacidad de respuesta al cambio y por consiguiente contribuye a su estabilidad. Además, se ha sugerido que la diversidad está asociada a la complejidad del sistema y por consiguiente a su robustez. Sin embargo el debate diversidad-estabilidad está abierto debido a la amplitud del concepto de diversidad y a las variadas medidas que la cuantifican (Page, 2011).

Particularmente, en el contexto urbano se ha empleado la entropía de la información como medida de la diversidad morfológica (Fariña, 1995; N Mohajeri, French, & Batty, 2013; Nahid Mohajeri & Gudmundsson, 2012), la diversidad de usos (Agencia de Ecología Urbana de Barcelona, 2010) y la diversidad en el metabolismo (Lin & Xia, 2013; Zhang et al., 2006). Los modelos existentes han analizado los diferentes elementos del sistema urbano de forma separada. Sin embargo, hasta ahora no se ha desarrollado una medida de diversidad que integre el análisis de los flujos metabólicos, las funciones urbanas y la estructura urbana, como herramienta para evaluar el ecosistema urbano en el marco de la sostenibilidad.

2.3.1 LA ENTROPÍA COMO MEDIDA DE DIVERSIDAD URBANA

En 1940 Claude Shannon presentó la ecuación de la *entropía de la información*, que es una parte de la teoría de la información. Esta teoría cuantifica la información y la capacidad de los sistemas para transmitirla. De acuerdo con esta teoría, el nivel de información se puede medir según la entropía (Shannon, 1948).

La *entropía de la información* mide la incertidumbre de una fuente de información y se puede considerar como la cantidad de información promedio que contienen los símbolos usados. La incertidumbre general en el sistema es la incapacidad de la variable para representar el comportamiento del sistema. Igualmente, es una medida del orden que tiene un sistema, entendiendo como orden la condición en la que resulta mas fácil distinguir una estructura diferenciada.

Shannon describió matemáticamente la *entropía de la información*, S , de la siguiente forma: La *entropía de la información* se define conceptualmente como el valor esperado del contenido de información $I(X)$, expresada por la variable aleatoria X . En un sistema incierto, si $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ para $n \geq 2$ y siendo X una variable aleatoria que es usada para representar el estado del sistema. La probabilidad de ocurrencia de un evento P es la frecuencia del evento respecto al número total de ocurrencias de todos los eventos, $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ ($0 \leq P_i \leq 1$; $i = 1, 2, \dots, n$; $\sum P_i = 1$). La entropía de la distribución de probabilidad es el valor esperado de la información contenida en la distribución. El valor esperado es cero cuando exactamente una de las probabilidades es igual a uno y todas las demás son cero. El valor máximo de entropía ocurre cuando todos los eventos son igualmente probables de ocurrir

$$S(x) = - \sum_{i=1}^n P(x_i) \log_b P(x_i) \quad (1)$$

En esta ecuación b indica la base del logaritmo. Cuando la base $b = 2$, las unidades de la *entropía de la información* son *bits*, los cuales usualmente se calculan para booleanos. Cuando la base es el número de Euler, $b = e$, las unidades se llaman *nat* y se usan típicamente en los cálculos de variables reales. Otra base que se puede usar es $b = 10$, llamada *dut* también para variables reales.

En los últimos años se han desarrollado modelos y metodologías de cálculo que emplean la *entropía de la información* como medida de la diversidad en el contexto urbano. En los sistemas urbanos se ha empleado la entropía de la información como medida de la diversidad morfológica (Fariña, 1995; N Mohajeri et al., 2013), la diversidad de usos (Agencia de Ecología Urbana de Barcelona, 2010) y la diversidad metabólica (Zhang et al., 2006).

Basada en la teoría de la *entropía de la información*, la Agencia de Ecología Urbana de Barcelona (2010) propuso un índice para medir la diversidad de usos y funciones del ecosistema urbano, diversidad que se ha asociado directamente con la complejidad urbana. Para el análisis de la morfología urbana, Fariña (1995) planteó una metodología de cálculo de la entropía de la estructura urbana. Particularmente, se ha empleado la entropía de la información como indicador de las redes viales y sus patrones estructurales (N Mohajeri et al., 2013). Por otra parte, Zhang et al. (2006) desarrollaron un sistema de indicadores y un modelo basado en la *entropía de la información* para medir los distintos flujos de un ecosistema urbano y evaluar la dirección de cambio en el desarrollo urbano. Haciendo uso de estas herramientas evaluaron la sostenibilidad en la evolución de la ciudad de Ningbo, en el periodo comprendido entre 1996 y 2003. Lin & Xia (2013) replican esta metodología

con algunas aportaciones, para evaluar el desarrollo sostenible de la ciudad de Guangzhou entre 2004 y 2010.

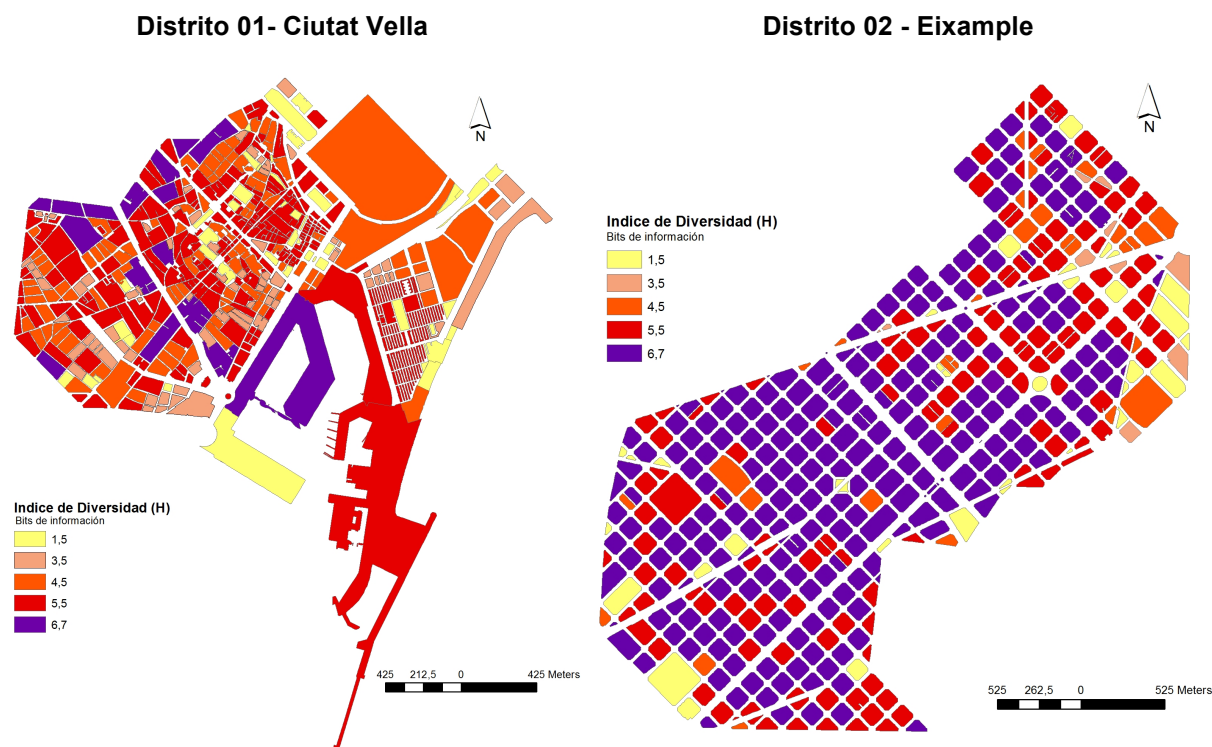
2.3.1.1 ENTROPÍA Y DIVERSIDAD EN CUATRO DISTRITOS DE BARCELONA

- DIVERSIDAD DE USOS O ÍNDICE DE DIVERSIDAD URBANA

El Índice de diversidad urbana propuesto por la Agencia de Ecología Urbana de Barcelona (AEUB), se calcula con la fórmula de la *entropía de la información* planteada por Shannon usando el logaritmo en base dos (Ecuación 1). Este índice está dado en bits de información por individuo. Por lo tanto, el índice de diversidad urbana será mayor cuanto mayor sea la diferenciación de los individuos y se presente la máxima probabilidad de cada uno de ellos. El índice comprende la cantidad de especies presentes (riqueza) y la cantidad relativa de individuos de cada una de estas especies (abundancia).

Los individuos o portadores de información del sistema urbano son las personas jurídicas clasificadas en; actividades económicas, entidades e instituciones, asociaciones y equipamientos del capital socioeconómico. Para la diferenciación de las personas jurídicas la AEUB define un sistema de clasificación que agrupa actividades económicas, instituciones, asociaciones, entre otros. Para esta clasificación toma como referencia la Clasificación Nacional de Actividades Económicas (CNAE).

Los resultados del índice de diversidad urbana calculado por la AEUB se muestran en un mapa general de Barcelona, que indica el valor de diversidad correspondiente para cada manzana. En la Figura 3 se muestran los resultados particulares para los distritos de; Ciutat Vella, Eixample, Les Corts y Gracia.



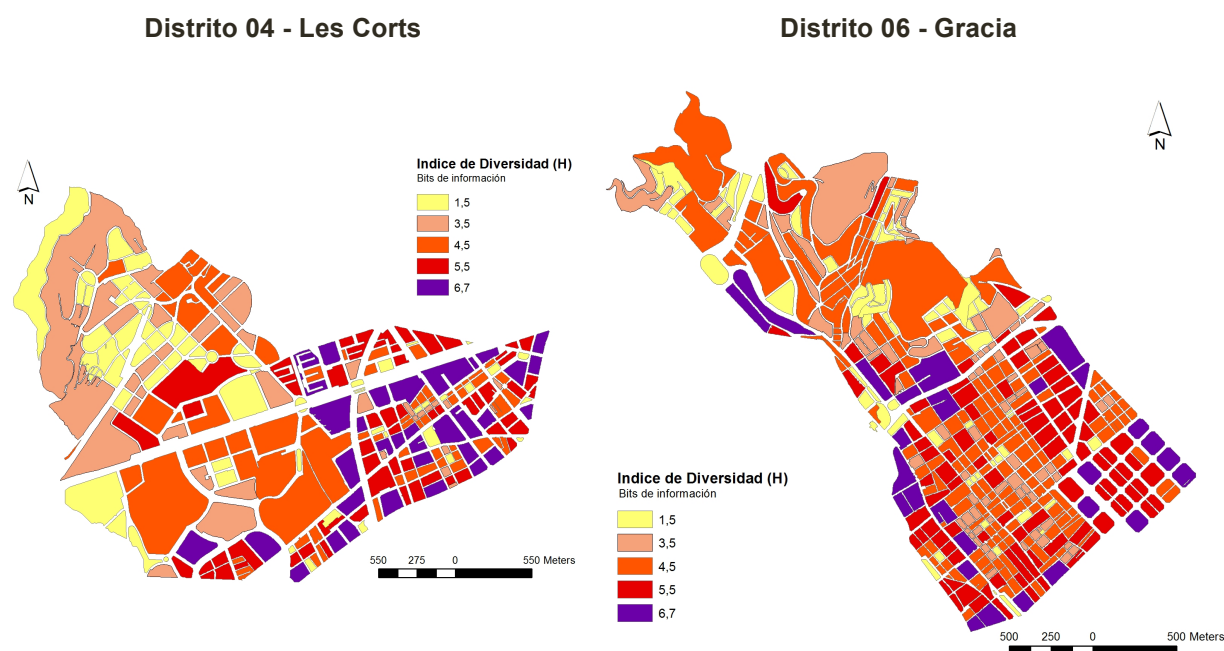


Figura 3: Índice de diversidad urbana en Ciutat vella, Eixample, Les Corts y Gracia. Fuente: Elaboración propia a partir de (Rueda, 2007).

Según la AEUB, aumentar la diversidad de usos y funciones urbanas aumenta las sinergias entre los diferentes individuos y la proximidad de los servicios urbanos, disminuyendo las necesidades de movilidad y por consiguiente reduciendo el consumo energético. Además el índice de diversidad deja en evidencia algunas variables asociadas a la forma de organización del sistema urbano; la mezcla de usos, el grado de centralidad y de desarrollo del territorio. El análisis del índice de diversidad proporciona algunas herramientas para establecer estrategias de planificación ya que permite; identificar los lugares con mayor concentración de actividades, nodos que tendrán asociada una mayor demanda de transporte. Identificar la proximidad de la población a los servicios básicos y equipamientos. Relacionar las actividades económicas con el número de personas que se movilizan a pie. Evaluar la dirección de los procesos de transformación urbana.

El Eixample se configura como el distrito con el índice de diversidad mas alto, con la mayor información organizada de toda Barcelona. La AEUB define algunas características del área central de Barcelona, a la cual corresponde un índice de diversidad alto (entre 5 y 6 bits de información por individuo) y muy alto (entre 6 y 7,4 bits de información por individuo)¹. En este distrito, la mezcla de usos y funciones en el territorio es elevada y se estructura en barrios alrededor del mercado. Los edificios del área central facilitan la mezcla de usos, donde cohabitan la vivienda, el comercio, el terciario e incluso la actividad productiva, por lo tanto, la proporción entre los diferentes usos es equilibrada. En el área central la conexión entre los diferentes usos tiene continuidad formal y por tanto puede realizarse a pie, además, la accesibilidad la ciudad central se complementa con el transporte público.

Sin embargo, en el cálculo de la entropía de la información del índice de diversidad (Salazar, 2014), es decir la diversidad de la diversidad, se aprecian tendencias diferentes en los cuatro distritos. Para apreciar mejor estas tendencias, en la Figura 4 se muestran los histogramas de frecuencias obtenidos para el índice de diversidad en los cuatro distritos anteriormente mencionados. Estos representan la distribución de diversidad en cada

¹ El índice de diversidad establece cinco rangos numéricos, pero no incluye una valoración cualitativa. Sin embargo, para efectos descriptivos se fijan aquí valores cualitativos para cada rango así; *muy bajo* de 0 – 3 bits, *bajo* de 3 – 4 bits, *medio* de 4 – 5 bits, *alto* de 5 – 6 bits y *muy alto* de 6 – 7,4 bits.

distrito. En Ciutat Vella, el 56% de las manzanas tienen un índice de diversidad de 5,5 bits y sólo el 3% de las manzanas presentan un índice de diversidad muy alto, de 6,7 bits. Como es evidente en la Figura 3, en el Eixample, la mayoría de las manzanas, el 53%, tienen un índice de diversidad muy alto (6,7 bits) y el 31% un índice de diversidad alto (5,5 bits). En el caso de Les Corts, no existe un valor determinantemente mayoritario, un 28% de las manzanas del distrito tienen un índice de diversidad medio, de 4,5 bits, y un 26% presentan un índice muy bajo. Esta situación se presenta principalmente en el barrio de Pedralbes (Ver Figura 13) en donde la actividad residencial es predominante y hay una diversidad de usos muy baja. En Gracia, predomina un índice de diversidad medio, 4,5 bits, en el 39% de las manzanas del distrito, en donde sólo el 6% tiene una diversidad muy alta.

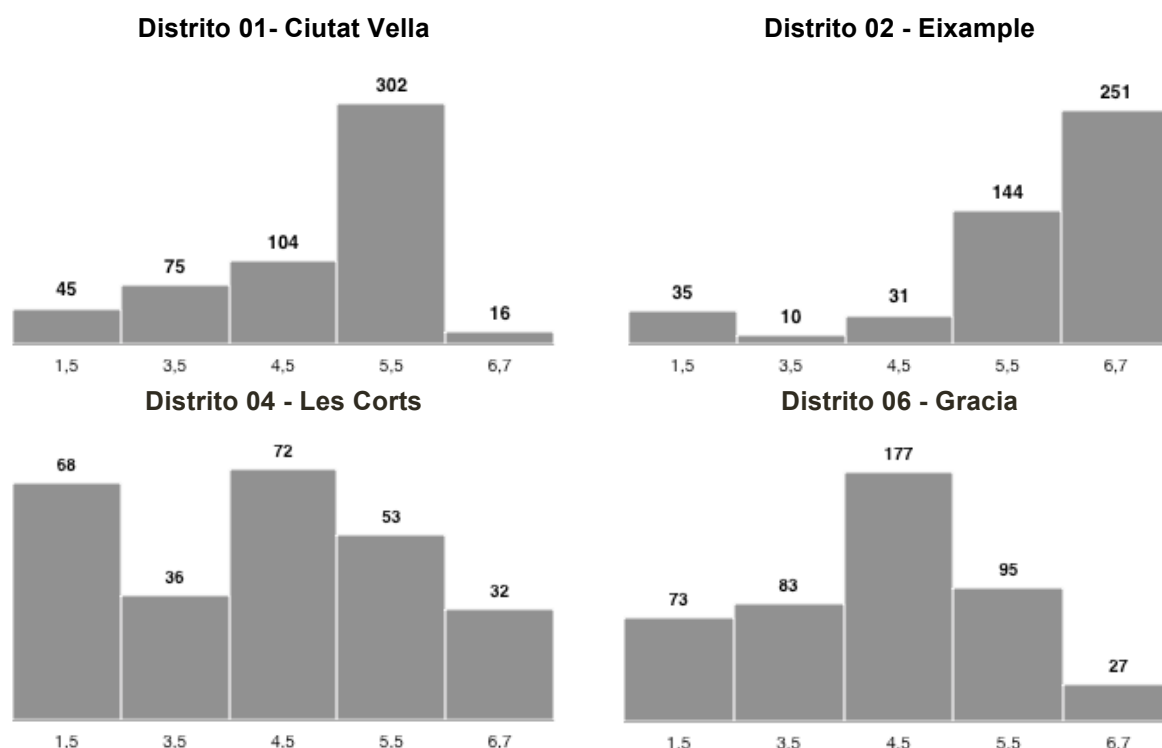


Figura 4: Histograma de frecuencias del Índice de diversidad urbana para cada distrito. Fuente: Elaboración propia.

• DIVERSIDAD MORFOLÓGICA O DIVERSIDAD ESTRUCTURAL

La metodología de cálculo de la entropía de la estructura urbana propuesta por Fariña (1995) se aplica en el trabajo de fin de máster en los siguientes distritos de Barcelona; Ciutat Vella, Eixample, Les Corts y Gracia. Esta metodología hace referencia a la diversidad morfológica o estructural, concretamente a la entropía producida por algunas características de la trama urbana, en su mayoría referidas al sistema vial. La diversidad morfológica contempla las siguientes variables; Dirección, Tipo de calle, Longitud de los tramos edificados, Ancho total de la calle, Altura de los edificios colindantes, Ancho de calzada, Ancho de aceras, Tipo de intersección y Número de ramales en la intersección.

A continuación se muestran los resultados comparados de la entropía como medida de la diversidad morfológica entre los cuatro distritos de Barcelona. En la Figura 5 se observa el resultado para cada una de las variables consideradas, igualmente se observa el promedio para cada distrito de las entropías calculadas.

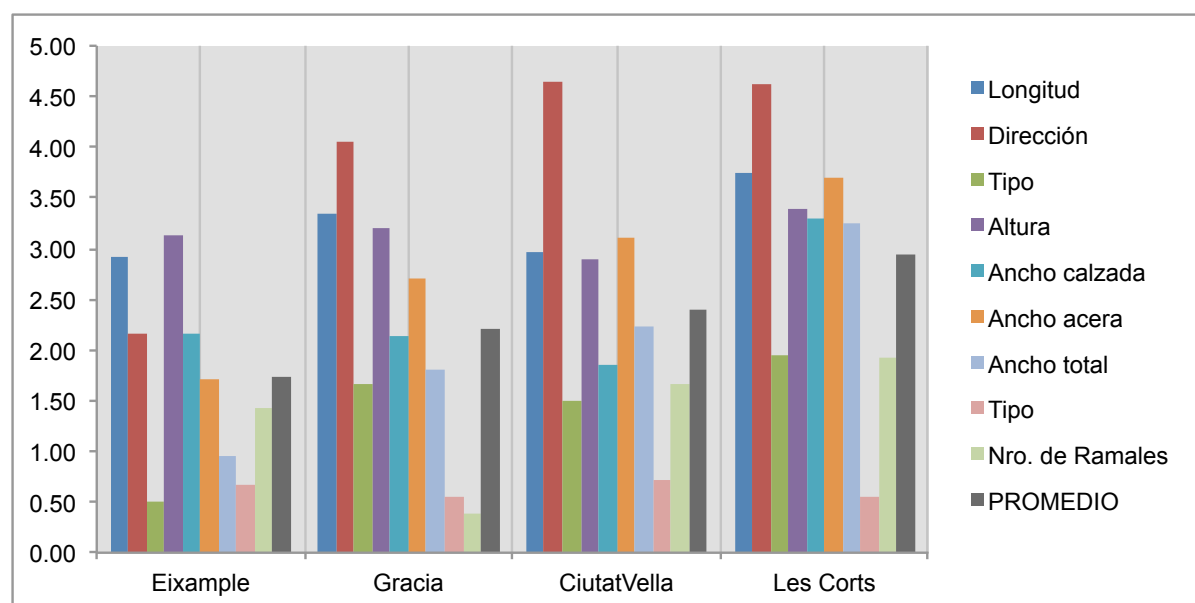


Figura 5: Resultados del cálculo de la entropía urbana para cada distrito.

En términos generales, se observa que el distrito de l'Eixample (1,74 bits) presenta la menor entropía promedio, seguido por el distrito de Gracia (2,21 bits). Por el contrario, el distrito de Les Corts (2,94 bits) presenta el valor mas alto de entropía promedio, seguido de Ciutat Vella (2,40 bits). Estos resultados reflejan el grado de orden de la estructura urbana. Así, l'Eixample que se caracteriza por una estructura urbana regular con una morfología ortogonal, presenta un alto grado de orden y por consiguiente una entropía baja. Les Corts por el contrario, se caracteriza por una estructura urbana morfológicamente mas heterogénea, sus tres barrios presentan trazados urbanos disimiles, no solo en aspectos formales, sino en las dimensiones de sus entidades (calles, parcelas, manzanas, vacíos, etc.).

• DIVERSIDAD METABÓLICA

Desde una perspectiva de análisis del ecosistema urbano Zhang, Yang, & Li (2006) y Lin & Xia (2013), emplean un sistema de indicadores y un modelo basado en la *entropía de la información* para medir los diferentes flujos del ecosistema urbano y evaluar la dirección de cambio en su desarrollo. Este modelo estudia la evolución del sistema urbano y la diversidad metabólica comprendida por; metabolismo de soporte, metabolismo de presión, metabolismo destructivo y metabolismo regenerativo. El modelo de medida basado en la *entropía de la información* sigue la siguiente metodología; primero, se define un sistema de indicadores de las cuatro categorías metabólicas, seguidamente, se calculan los cuatro tipos de entropía, después, se analizan el flujo y la producción de entropía en el sistema, finalmente, se calcula el peso referente a cada indicador y la puntuación ponderada (G).

Dicho modelo se aplica en el trabajo de fin de máster en el caso de estudio de cuatro distritos de Barcelona; Ciutat Vella, Eixample, Les Corts y Gracia, en el período comprendido entre 2003 y 2012 (Salazar, 2014). Para la definición de los indicadores, se tienen en cuenta diferentes criterios; la correspondencia con los indicadores de referencia (Lin & Xia, 2013; Zhang et al., 2006) que describen los diferentes tipos de metabolismo; de soporte, de presión, destructivo y regenerativo. La disponibilidad de datos evolutivos desagregados por distritos. Y la información potencial que aporta cada indicador en el sistema de indicadores, que tiene por objetivo evaluar la evolución del ecosistema urbano en dirección hacia la sostenibilidad o insostenibilidad. Se consideran como referencia; las metas anuales y los indicadores para ciudades sostenibles (Bettini, 1998; Newman, 1999).

A continuación se presenta el sistema de indicadores definidos en el modelo basado en la *entropía de la información* para la medida de los diferentes flujos metabólicos en Ciutat Vella, Eixample, Les Corts y Gracia. También se presentan los principales resultados obtenidos con dicha metodología para cada categoría metabólica; de soporte, de presión, destructiva y regenerativa.

Tipo de Metabolismo	Id	Indicador	Unidades
Metabolismo de SOPORTE	A ₁	Superficie locales Vivienda	m ₂
	A ₂	Superficie locales Aparcamiento	m ₂
	A ₃	Superficie locales Comercio	m ₂
	A ₄	Superficie locales Industria	m ₂
	A ₅	Superficie locales Oficinas	m ₂
	A ₆	Superficie locales Educación	m ₂
	A ₇	Superficie locales Sanidad	m ₂
	A ₈	Superficie locales Hostelería	m ₂
	A ₉	Superficie locales Deportivo	m ₂
	A ₁₀	Superficie locales Religioso	m ₂
	A ₁₁	Superficie locales Espectaculos	m ₂
	A ₁₂	Superficie locales Otros Usos	m ₂
	A ₁₃	Equipamientos culturales en el distrito	Unidades
	A ₁₄	Equipamientos deportivos en el distrito	Unidades
	A ₁₅	Nivel de seguridad en el barrio	Puntuación
	A ₁₆	Fuentes publicas	Unidades
	A ₁₇	Areas de juegos infantiles	Unidades
	A ₁₈	Paradas de Mercado activas	Unidades
	A ₁₉	Arbolado viario. Unidad de arbolado viario=5,6 m2	Unidad
	A ₂₀	Superficie Parques Urbanos	ha
	A ₂₁	Superficie Resto de Verde Urbano	ha
Metabolismo de PRESIÓN	B ₁	Tasa de crecimiento natural	-
	B ₂	Densidad de la población	Hab/ha
	B ₃	Cantidad total de vehículos	Unidades
	B ₄	Volumen total de agua suministrada Comercio	m ₃
	B ₅	Volumen total de agua suministrada Domestico	m ₃
	B ₆	Volumen total de agua suministrada Industria	m ₃
	B ₇	Volumen total de agua suministrada Otros usos	m ₃
	B ₈	RFD - Renta Familiar Disponible per capita	Indice RFD
	B ₉	Oferta de alojamiento	Plazas
	B ₁₀	Consumo de energía final	MWh/año
Metabolismo DESTRUCTIVO	C ₁	Niveles medios de PM10	µg/m ₃
	C ₂	Niveles máximos diarios promedio de SO2	µg/m ₃
	C ₃	Niveles medios de NO2	µg/m ₃
	C ₄	Niveles medios de CO	mg/m ₃
	C ₅	Volumen de recogida de fracción resto	ton
	C ₆	Accidentes de tránsito	Unidades
Metabolismo REGENERATIVO	D ₁	Volumen de recogida fracción papel-cartón	ton
	D ₂	Volumen de recogida fracción vidrio	ton
	D ₃	Volumen de recogida fracción envases	ton
	D ₄	Gastos de conservación	Miles de €
	D ₅	Superficies de zonas y calles con prioridad peatonal	ha
	D ₆	Cantidad de envases ligeros tratados	ton

Tabla 2: Categorías e Indicadores empleados en el cálculo de la entropía como medida de la diversidad metabólica (Salazar, 2014). Fuente: Elaboración propia.

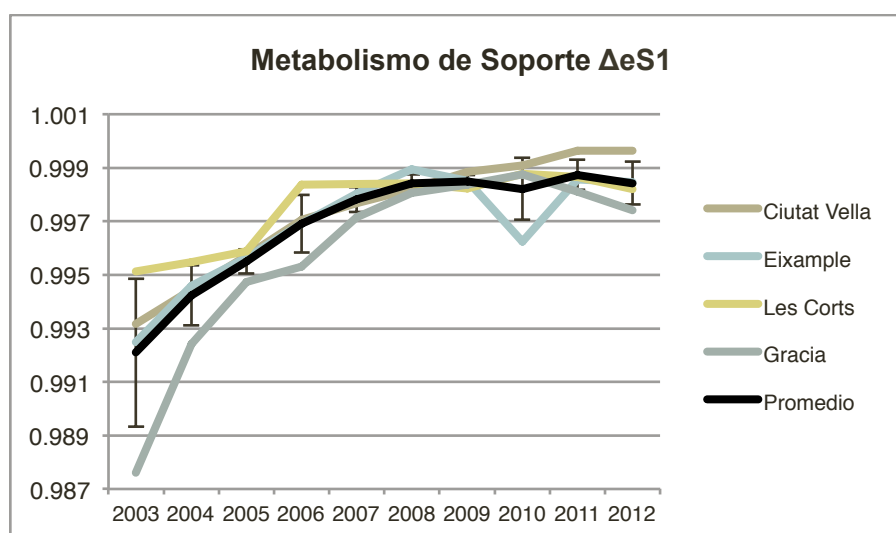


Figura 6: Resultados del cálculo de la entropía del Metabolismo de Soporte de entrada ($\Delta eS1$) para los distritos de Ciutat Vella, Eixample, Les Corts y Gracia.

En la Figura 6 se observa una tendencia generalizada de crecimiento, una evolución del Metabolismo de Soporte hacia el estado óptimo, es decir, un aumento en la capacidad de carga del sistema. También se observa un punto de inflexión que se sitúa en 2008, periodo a partir del cual la entropía tiende a estabilizarse, este año representa un punto límite en el crecimiento de este tipo de metabolismo y puede asociarse con la crisis económica española que tiene inicio en 2008. La mayoría de los indicadores incluidos en esta categoría (ver Tabla 2) hacen referencia a la diversidad de funciones, equipamientos y servicios urbanos, relacionados con la habitabilidad del ecosistema urbano. En este sentido, la Figura 6 muestra una estabilización de la entropía de Metabolismo de Soporte y una homogenización de los servicios urbanos en los diferentes distritos.

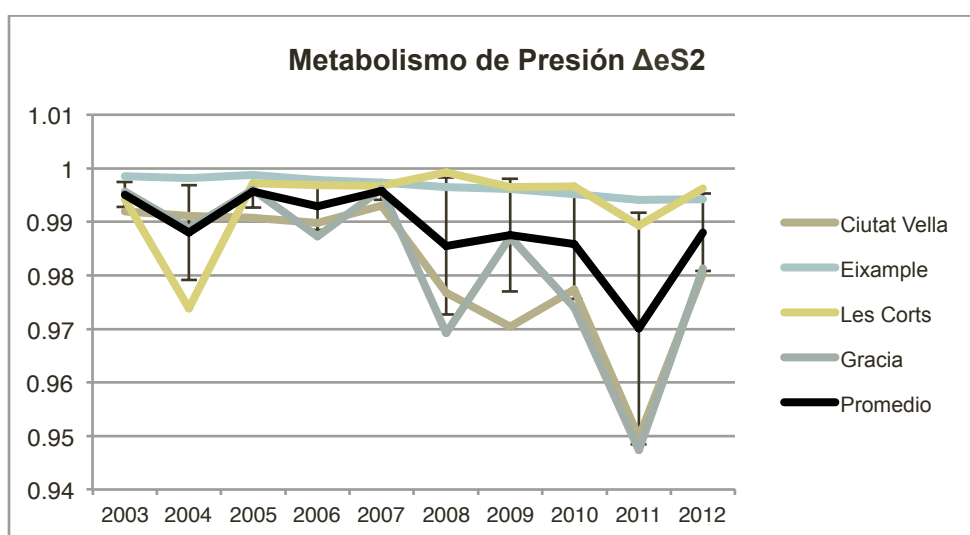


Figura 7: Resultados del cálculo de la entropía del Metabolismo de Presión de salida ($\Delta eS2$) para los distritos de Ciutat Vella, Eixample, Les Corts y Gracia.

En general, en la Figura 7 se observa que hay una disminución generalizada de la entropía del Metabolismo de Presión en el periodo de análisis. Los indicadores contemplados en esta categoría hacen referencia principalmente al consumo, por lo tanto, considerando el criterio definido como óptimo, la figura refleja un aumento generalizado de la presión impuesta por los subsistemas económico y social, es decir un comportamiento evolutivo en dirección degenerativa.

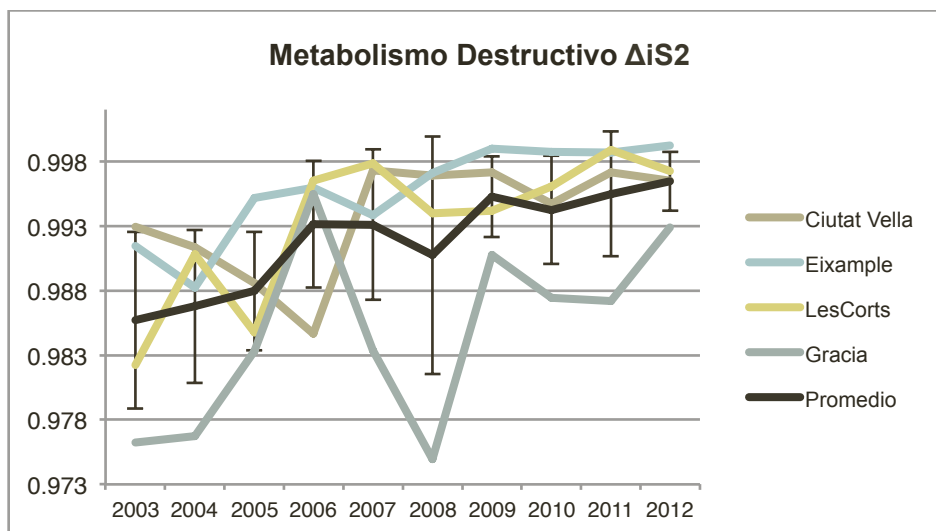


Figura 8: Resultados del cálculo de la entropía del Metabolismo Destructivo ($\Delta iS2$) para los distritos de Ciutat Vella, Eixample, Les Corts y Gracia.

En la Figura 8 se muestra una tendencia de crecimiento con algunas variaciones para este la entropía referente al Metabolismo Destructivo. Los indicadores agrupados en esta categoría hacen referencia a la contaminación y destrucción del sistema, por lo tanto, considerando el criterio definido como óptimo, la figura refleja una disminución generalizada del metabolismo destructivo en el área de estudio.

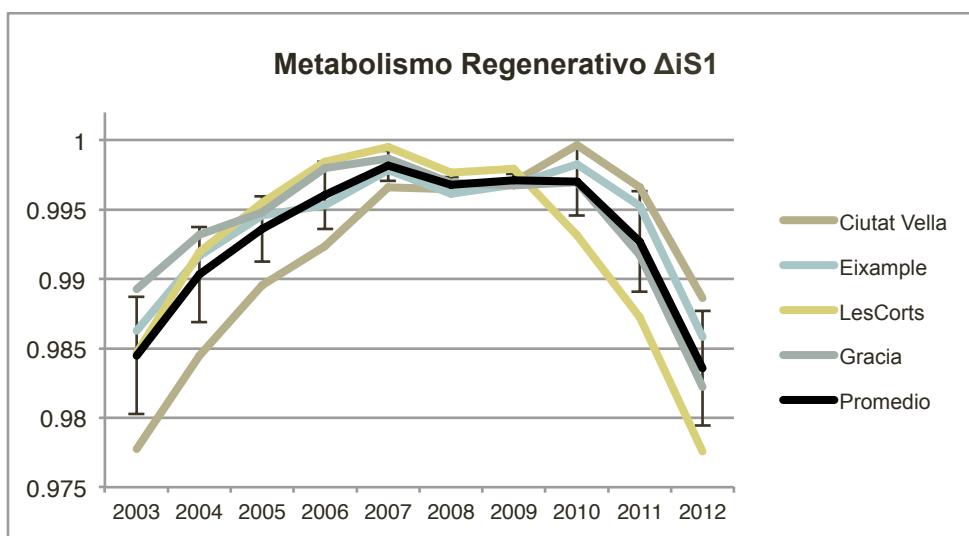


Figura 9: Resultados del cálculo de la entropía del Metabolismo Regenerativo ($\Delta iS1$) para los distritos de Ciutat Vella, Eixample, Les Corts y Gracia.

En general, en la Figura 9 se observa una tendencia homogénea en la evolución de la entropía de Metabolismo regenerativo en todos los distritos. Se puede apreciar un punto de inflexión que se sitúa entre 2008 y 2009, periodo a partir del cual la entropía desciende, es decir, la construcción ecológica disminuye con respecto al nivel alcanzado en 2009.

3 ESTADO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 LA DIVERSIDAD DE BARCELONA, UNA APROXIMACIÓN A PARTIR DEL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

Se plantea una aproximación a la diversidad de Barcelona a partir del análisis de componentes principales. A continuación se presentan los indicadores empleados en dicho análisis y los principales resultados obtenidos para el caso de estudio de Ciutat Vella, Eixample, Les Corts y Gracia, en el período 2003 – 2013.

3.1.1 SISTEMA DE INDICADORES PARA CADA CATEGORÍA METABÓLICA

Distrito		CiutatVella											
Tipo	Nombre del Indicador	Unidades	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
1_Soporte de entrada	A ₁ Superficie locales Vivienda	m ₂ /hab	37,01	36,72	35,52	34,95	35,47	35,45	36,88	37,87	38,20	37,98	38,45
	A ₂ Superficie locales Comercio	m ₂ /hab	5,56	5,57	5,44	5,41	5,54	5,59	5,87	6,08	6,21	6,20	6,28
	A ₃ Superficie locales Oficinas	m ₂ /hab	6,58	6,55	6,36	6,28	6,40	6,42	6,60	7,07	7,01	6,92	7,21
	A ₄ Superficie locales Educación	m ₂ /hab	2,96	2,98	2,92	2,92	3,00	3,04	3,22	3,31	3,38	3,45	3,51
	A ₅ Superficie locales Sanidad	m ₂ /hab	0,62	0,62	0,59	0,58	0,59	0,59	0,61	0,63	0,63	0,63	0,66
	A ₆ Superficie locales Deportivo	m ₂ /hab	0,27	0,27	0,26	0,25	0,26	0,26	0,27	0,30	0,41	0,42	0,42
	A ₇ Superficie locales Religioso	m ₂ /hab	0,80	0,79	0,76	0,74	0,74	0,74	0,76	0,78	0,77	0,77	0,77
	A ₈ Superficie locales Espectáculos	m ₂ /hab	0,82	0,80	0,76	0,74	0,74	0,73	0,76	0,75	0,75	0,74	0,75
	A ₉ Superficie locales Otros Usos Equipamientos culturales en el distrito	m ₂ /hab	2,54	2,54	2,47	2,45	2,50	2,51	2,57	2,76	2,88	2,68	2,71
	A ₁₀ Equipamientos deportivos en el distrito	Ud/hab	2,62E-04	1,95E-04	2,16E-04	2,21E-04	2,06E-04	2,06E-04	2,42E-04	2,77E-04	2,70E-04	2,59E-04	2,61E-04
	A ₁₁ Nivel de seguridad en el barrio	Ud/hab	1,09E-03	1,06E-03	1,03E-03	1,10E-03	1,11E-03	1,11E-03	1,44E-03	1,53E-03	1,42E-03	1,42E-03	1,55E-03
	A ₁₂ Fuentes publicas	Puntuación	4,8	4,7	4,9	5,0	5,3	5,2	4,9	4,9	4,8	5,2	5,2
	A ₁₃ Áreas de juegos infantiles	Ud/hab	9,93E-04	9,57E-04	9,17E-04	9,10E-04	8,97E-04	9,14E-04	9,40E-04	9,57E-04	9,75E-04	9,57E-04	9,48E-04
	A ₁₄ Paradas de Mercado activas	Ud/hab	2,06E-04	2,04E-04	1,80E-04	1,94E-04	2,15E-04	2,42E-04	2,42E-04	2,77E-04	2,70E-04	2,78E-04	3,10E-04
2_Presión de salida	A ₁₅ Arbolado viario. Unidad de arbolado viario=5,6 m2	Ud/hab	9,80E-03	9,50E-03	8,72E-03	8,63E-03	8,63E-03	8,47E-03	8,82E-03	9,13E-03	9,19E-03	9,12E-03	9,20E-03
	A ₁₆ Superficie Parques Urbanos	/hab	6,38E-02	6,29E-02	5,83E-02	5,84E-02	6,04E-02	5,76E-02	6,47E-02	6,54E-02	6,69E-02	6,81E-02	6,75E-02
	A ₁₇ Superficie Resto de Verde Urbano	ha/hab	3,49E-04	3,46E-04	3,34E-04	3,29E-04	3,34E-04	3,33E-04	3,46E-04	3,56E-04	3,59E-04	3,56E-04	3,61E-04
	B ₁ Tasa de crecimiento natural	-	-4,7	-1,5	-1,2	-1,1	-1,4	0,1	0,4	0	0,9	-0,3	-0,5
	B ₂ Densidad de la población	Hab/ha	244	246	254	258	255	245	239	239	236	239	237
	B ₃ Cantidad total de vehículos	Ud/hab	0,41	0,42	0,42	0,42	0,44	0,45	0,46	0,49	0,49	0,48	0,43
	B ₄ Volumen total de agua suministrada Comercio	m ₃ /hab	36,34	35,61	34,01	32,67	34,21	32,74	32,74	33,55	33,77	33,05	33,53
	B ₅ Volumen total de agua suministrada Domestico	m ₃ /hab	41,72	40,84	38,97	37,75	38,07	37,13	38,07	38,73	38,91	37,95	37,14
	B ₆ Volumen total de agua suministrada Industria	m ₃ /hab	5,29	5,00	4,59	4,35	4,32	3,63	3,43	3,30	4,21	3,01	2,71
	B ₇ Volumen total de agua suministrada Otros usos	m ₃ /hab	10,58	10,28	9,73	10,81	10,02	7,01	8,40	8,63	9,11	9,52	9,32
	B ₈ RFD - Renta Familiar Disponible per capita	Indice RFD Bcn=100	71,0	70,8	72,0	72,6	73,5	71,2	74,2	75,2	76,4	76,6	77,2
	B ₉ Oferta de alojamiento	Piadas/hab	1,12E-01	1,15E-01	1,20E-01	1,19E-01	1,24E-01	1,32E-01	1,57E-01	1,78E-01	1,87E-01	1,89E-01	1,95E-01
	B ₁₀ Consumo de energía final	MWh/año. hab	9,89	9,94	9,61	10,22	10,09	8,89	9,57	9,67	9,77	9,64	9,64
	B ₁₁ Superficie locales Aparcamiento	m ₂ /hab	3,16	3,28	3,32	3,40	3,60	3,73	3,94	4,40	4,52	4,54	4,61
3_Metabolismo destructivo	B ₁₂ Superficie locales Industria	m ₂ /hab	5,10	4,96	4,71	4,54	4,51	4,41	4,50	4,50	4,46	4,32	4,34
	C ₁ Niveles medios de PM10	µg/m ₃	51	46	47	52	43	43	33	29	31,6	31	26
	C ₂ Niveles medios de NO2	µg/m ₃	57	43	48	47	46	42	46	46	40	42	35
	C ₃ Niveles medios de CO	mg/m ₃	0,5	0,5	0,5	0,3	0,4	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3
	C ₄ Volumen de recogida de fracción resto	ton/hab	2,36E-01	2,23E-01	2,14E-01	2,13E-01	2,15E-01	2,01E-01	2,00E-01	2,19E-01	2,17E-01	1,93E-01	1,90E-01
4_Metabolismo regenerativo	C ₅ Accidentes de transito	Ud/hab	7,81E-03	7,04E-03	6,81E-03	6,16E-03	6,87E-03	5,99E-03	5,88E-03	5,26E-03	5,54E-03	5,52E-03	5,54E-03
	D ₁ Volumen de recogida fracción papel-cartón	ton/hab	2,20E-02	2,51E-02	2,93E-02	2,98E-02	3,44E-02	3,54E-02	3,25E-02	3,90E-02	2,94E-02	2,43E-02	2,05E-02
	D ₂ Volumen de recogida fracción vidrio	ton/hab	7,98E-03	8,43E-03	8,81E-03	9,09E-03	1,08E-02	1,14E-02	1,21E-02	1,51E-02	1,49E-02	1,41E-02	1,42E-02
	D ₃ Volumen de recogida fracción envases	ton/hab	4,21E-03	4,52E-03	4,67E-03	4,87E-03	6,14E-03	6,60E-03	7,04E-03	9,44E-03	8,99E-03	8,26E-03	8,02E-03
	D ₄ Gastos de conservación Superficies de zonas y calles con prioridad peatonal	Miles€/hab	6,90E-03	6,84E-03	5,57E-03	6,90E-03	7,22E-03	7,43E-03	7,84E-03	8,34E-03	8,42E-03	8,10E-03	8,18E-03
	D ₅	ha/hab	2,02E-04	2,06E-04	2,00E-04	1,92E-04	2,00E-04	1,94E-04	2,09E-04	2,23E-04	2,26E-04	2,25E-04	2,33E-04

Tabla 3: Valores del sistema de indicadores para el distrito Ciutat Vella entre 2003 y 2013. Fuente: Elaboración propia a partir de (Departament d'Estadística, 2013).

Para la definición del sistema de indicadores se tuvieron en cuenta las variables empleadas en el modelo de la entropía como medida de los flujos metabólicos descrito en el apartado

anterior y el aporte de cada indicador en la descripción de las diferentes categorías metabólicas; de soporte, de presión, destructiva y regenerativa.

A diferencia de los valores empleados en el cálculo de la entropía como medida del metabolismo urbano, para realizar el análisis de componentes principales, se consideran los datos per cápita como se muestra en las Tablas 3 - 6. En el caso de los indicadores; Nivel de seguridad en el barrio (A12), Tasa de crecimiento natural (B1), Densidad de la población (B2), Renta Familiar Disponible per cápita (B8), Niveles medios de PM10 (C1), Niveles medios de NO2 (C2) y Niveles medios de CO (C3), se consideraron los valores iniciales, por tratarse de indicadores generales o ya desagregados.

Distrito		Eixample											
Tipo	Nombre del Indicador	Unidades	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
1. Soporte de entrada	A ₁ Superficie locales Vivienda	m ₂ /hab	48,04	48,47	48,15	47,68	48,34	47,82	47,69	48,06	48,38	48,17	48,44
	A ₂ Superficie locales Comercio	m ₂ /hab	6,91	7,00	6,98	6,94	7,06	7,01	7,06	7,07	7,11	7,22	7,27
	A ₃ Superficie locales Oficinas	m ₂ /hab	8,40	8,43	8,33	8,20	8,27	8,13	8,03	8,12	8,09	7,98	7,98
	A ₄ Superficie locales Educación	m ₂ /hab	1,38	1,42	1,45	1,47	1,53	1,54	1,58	1,61	1,68	1,69	1,74
	A ₅ Superficie locales Sanidad	m ₂ /hab	1,07	1,11	1,13	1,15	1,20	1,22	1,25	1,29	1,34	1,35	1,36
	A ₆ Superficie locales Deportivo	m ₂ /hab	0,13	0,16	0,18	0,19	0,22	0,24	0,26	0,28	0,31	0,32	0,31
	A ₇ Superficie locales Religioso	m ₂ /hab	0,35	0,36	0,35	0,35	0,36	0,35	0,35	0,35	0,36	0,35	0,35
	A ₈ Superficie locales Espectáculos	m ₂ /hab	0,29	0,31	0,31	0,32	0,33	0,34	0,36	0,35	0,35	0,40	0,40
	A ₉ Superficie locales Otros Usos Equipamientos culturales en el distrito	m ₂ /hab	0,50	0,50	0,50	0,50	0,51	0,51	0,52	0,52	0,52	0,53	0,53
	A ₁₀ Equipamientos deportivos en el distrito	Ud/hab	5,72E-05	5,76E-05	5,33E-05	5,65E-05	6,10E-05	7,15E-05	7,12E-05	6,77E-05	8,70E-05	9,40E-05	8,69E-05
	A ₁₁ Nivel de seguridad en el barrio	Puntuación	6,3	6,3	6,4	6,2	6,4	6,3	6,4	6,4	6,5	6,6	7,6
	A ₁₂ Fuentes públicas	Ud/hab	7,21E-04	7,22E-04	7,16E-04	7,12E-04	7,47E-04	7,45E-04	7,42E-04	7,52E-04	7,71E-04	7,60E-04	7,63E-04
	A ₁₄ Áreas de juegos infantiles	Ud/hab	2,33E-04	2,38E-04	2,44E-04	2,33E-04	2,59E-04	2,52E-04	2,51E-04	2,63E-04	2,84E-04	2,93E-04	2,98E-04
	A ₁₅ Paradas de Mercado activas	Ud/hab	4,44E-03	4,44E-03	4,24E-03	4,21E-03	4,16E-03	3,55E-03	2,81E-03	1,81E-03	2,78E-03	2,76E-03	2,70E-03
2. Presión de salida	A ₁₆ Arbolado viario. Unidad de arbolado viario=5,6 m2	/hab	8,71E-02	8,65E-02	8,49E-02	8,32E-02	8,43E-02	8,33E-02	8,31E-02	8,42E-02	8,56E-02	8,59E-02	8,63E-02
	A ₁₇ Superficie Parques Urbanos	ha/hab	5,08E-05	5,11E-05	4,23E-05	5,01E-05	4,55E-05	4,18E-05	4,16E-05	4,18E-05	4,20E-05	4,18E-05	4,19E-05
	A ₁₈ Superficie Resto de Verde Urbano	ha/hab	1,43E-04	1,46E-04	1,67E-04	1,45E-04	1,43E-04	1,49E-04	1,44E-04	1,35E-04	1,36E-04	1,41E-04	1,42E-04
	B ₁ Tasa de crecimiento natural	-	-4,4	-2,9	-3,2	-2,8	-3	-3	-2,7	-2,5	-2,3	-2,8	-2,9
	B ₂ Densidad de la población	Hab/ha	352	349	352	356	352	357	358	357	355	357	354
	B ₃ Cantidad total de vehículos	Ud/hab	0,63	0,64	0,65	0,65	0,67	0,66	0,65	0,64	0,64	0,63	0,59
	B ₄ Volumen total de agua suministrada Comercio	m ₃ /hab	19,29	19,35	19,11	19,09	18,98	17,83	18,63	18,58	19,13	18,41	18,01
	B ₅ Volumen total de agua suministrada Domestico	m ₃ /hab	43,38	43,67	43,30	43,05	43,06	40,78	43,86	43,75	43,59	42,69	41,95
	B ₆ Volumen total de agua suministrada Industria	m ₃ /hab	2,11	2,15	2,16	2,21	2,43	2,07	2,18	2,11	2,05	2,50	2,49
	B ₇ Volumen total de agua suministrada Otros usos	m ₃ /hab	2,44	2,39	2,31	2,26	2,44	1,75	2,07	1,88	2,10	1,91	1,81
	B ₈ RFD - Renta Familiar Disponible per capita	Indice RFD Bcn=100	117,7	117,0	116,3	114,0	115,8	114,9	114,5	114,4	111,8	110,6	116,4
	B ₉ Oferta de alojamiento	Plazas/hab MWh/año.	3,36E-02	3,51E-02	4,02E-02	4,58E-02	4,77E-02	5,24E-02	5,53E-02	5,75E-02	5,98E-02	6,03E-02	6,79E-02
	B ₁₀ Consumo de energía final	hab	14,74	15,03	14,90	15,92	15,68	13,65	14,10	13,91	13,99	13,86	13,86
	B ₁₁ Superficie locales Aparcamiento	m ₂ /hab	6,92	7,12	7,20	7,26	7,49	7,54	7,69	7,80	7,98	8,15	8,33
	B ₁₂ Superficie locales Industria	m ₂ /hab	6,64	6,57	6,40	6,22	6,18	6,00	5,89	5,75	5,68	5,59	5,58
3. Metabolismo destructivo	C ₁ Niveles medios de PM10	µg/m ₃	58	55	55	59	49	44	40	34	34	33	27
	C ₂ Niveles medios de NO2	µg/m ₃	54	60	68	68	66	65	64	64	65	61	56
	C ₃ Niveles medios de CO	mg/m ₃	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,6	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6
	C ₄ Volumen de recogida de fracción resto	ton/hab	4,53E-01	4,55E-01	4,47E-01	4,27E-01	4,40E-01	4,53E-01	4,38E-01	3,81E-01	3,75E-01	3,46E-01	3,43E-01
	C ₅ Accidentes de tránsito	Ud/hab	1,23E-02	1,21E-02	1,23E-02	1,18E-02	1,21E-02	1,09E-02	9,91E-03	1,01E-02	9,20E-03	9,92E-03	1,04E-02
4. Metabolismo regenerativo	D ₁ Volumen de recogida fracción papel-cartón	ton/hab	3,51E-02	3,97E-02	4,62E-02	4,88E-02	5,47E-02	5,42E-02	4,92E-02	5,22E-02	4,13E-02	3,37E-02	2,87E-02
	D ₂ Volumen de recogida fracción vidrio	ton/hab	1,26E-02	1,35E-02	1,43E-02	1,52E-02	1,79E-02	1,80E-02	1,83E-02	2,01E-02	2,04E-02	1,90E-02	1,95E-02
	D ₃ Volumen de recogida fracción envases	ton/hab	6,71E-03	7,15E-03	7,51E-03	8,17E-03	9,96E-03	1,03E-02	1,07E-02	1,26E-02	1,26E-02	1,15E-02	1,12E-02
	D ₄ Gastos de conservación Superficies de zonas y calles	Miles€/hab	3,32E-03	3,34E-03	2,79E-03	3,70E-03	3,62E-03	3,69E-03	3,74E-03	3,87E-03	3,89E-03	3,76E-03	3,77E-03
	D ₅ con prioridad peatonal	ha/hab	2,24E-05	2,27E-05	2,25E-05	2,37E-05	2,40E-05	2,37E-05	2,36E-05	2,37E-05	2,46E-05	2,52E-05	2,53E-05

Tabla 4: Valores del sistema de indicadores para el distrito Eixample entre 2003 y 2013. Fuente: Elaboración propia a partir de (Departament d'Estadística, 2013).

La decisión de emplear los datos desagregados por habitantes responde a la motivación de hacer una comparación centrada en los servicios y consumos propios de cada habitante en un determinado distrito. Sin embargo, el debate de analizar los sistemas urbanos con indicadores agregados o desagregados, bien sea por superficie o habitantes, es una debate abierto y en el cual se pretende hacer aportaciones.

En total se consideran cuarenta (40) indicadores, de los cuales; dieciocho (18) pertenecen a la categoría de metabolismo de soporte, doce (12) a la categoría de metabolismo de presión, cinco (5) a la categoría de metabolismo destructivo y cinco (5) a la categoría de metabolismo regenerativo.

En algunos de los indicadores dentro del metabolismo de soporte de entrada, se considera la ciudad de Barcelona como el sistema de soporte de los distritos. En este sentido, además de incluir indicadores asociados al capital natural de la ciudad, se tienen en cuenta indicadores referidos a la habitabilidad y la complejidad de servicios que ofrece el sistema urbano.

Distrito		Les Corts											
Tipo	Nombre del Indicador	Unidades	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
1. Soporte de entrada	A ₁ Superficie locales Vivienda	m ₂ /hab	42,45	43,22	43,42	43,55	44,37	44,12	44,09	44,33	44,81	45,02	45,42
	A ₂ Superficie locales Comercio	m ₂ /hab	5,80	5,89	5,90	5,90	5,99	5,94	5,89	5,97	5,98	5,98	6,02
	A ₃ Superficie locales Oficinas	m ₂ /hab	7,26	7,37	7,37	7,37	7,47	7,40	7,33	7,42	7,48	7,40	7,47
	A ₄ Superficie locales Educación	m ₂ /hab	4,66	5,07	5,41	5,75	6,17	6,46	6,84	6,91	7,70	7,79	7,86
	A ₅ Superficie locales Sanidad	m ₂ /hab	1,08	1,09	1,09	1,09	1,11	1,09	1,09	1,39	1,46	1,74	1,76
	A ₆ Superficie locales Deportivo	m ₂ /hab	3,99	4,04	4,04	4,03	4,09	4,05	4,02	4,03	4,06	4,05	4,09
	A ₇ Superficie locales Religioso	m ₂ /hab	0,46	0,48	0,49	0,50	0,51	0,52	0,53	0,53	0,53	0,57	0,57
	A ₈ Superficie locales Espectáculos	m ₂ /hab	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
	A ₉ Superficie locales Otros Usos Equipamientos culturales en el distrito	m ₂ /hab	2,06	2,02	1,95	1,88	1,83	1,74	1,63	1,61	1,60	1,41	1,46
	A ₁₀ Equipamientos deportivos en el distrito	Ud/hab	2,39E-05	2,42E-05	2,42E-05	2,42E-05	2,45E-05	2,42E-05	2,41E-05	2,41E-05	2,43E-05	2,43E-05	2,45E-05
	A ₁₁ Nivel de seguridad en el barrio	Puntuación	5,26E-04	5,09E-04	5,09E-04	9,31E-04	9,43E-04	9,33E-04	1,07E-03	1,10E-03	1,01E-03	1,03E-03	1,02E-03
	A ₁₂ Fuentes públicas	Ud/hab	6,5	6,4	6,5	6,6	6,7	6,7	6,8	6,8	6,9	7,0	6,9
	A ₁₃ Áreas de juegos infantiles	Ud/hab	8,85E-04	8,84E-04	8,84E-04	8,58E-04	8,70E-04	8,73E-04	8,68E-04	8,45E-04	8,61E-04	8,61E-04	8,57E-04
	A ₁₄ Paradas de Mercado activas	Ud/hab	4,66E-04	4,48E-04	4,48E-04	4,47E-04	4,53E-04	4,49E-04	4,34E-04	4,95E-04	4,85E-04	4,85E-04	5,14E-04
	A ₁₅ Arbolado viario. Unidad de arbolado viario=5,6 m ²	Ud/hab	1,66E-03	1,67E-03	1,65E-03	1,60E-03	1,35E-03	1,33E-03	1,33E-03	1,33E-03	1,36E-03	1,36E-03	1,37E-03
	A ₁₆ Superficie Parques Urbanos	ha/hab	1,49E-01	1,53E-01	1,51E-01	1,49E-01	1,51E-01	1,57E-01	1,60E-01	1,69E-01	1,72E-01	1,73E-01	1,73E-01
	A ₁₇ Superficie Resto de Verde Urbano	ha/hab	3,05E-04	3,09E-04	3,09E-04	3,08E-04	3,16E-04	3,09E-04	3,07E-04	3,08E-04	3,09E-04	3,42E-04	3,45E-04
	A ₁₈ Urbano	ha/hab	5,55E-04	5,69E-04	5,74E-04	5,78E-04	5,82E-04	5,81E-04	5,75E-04	6,01E-04	6,05E-04	5,74E-04	6,14E-04
2. Presión de salida	B ₁ Tasa de crecimiento natural	-	-1,4	-0,2	-1,8	-2,1	-1,7	-2,5	-1,4	-1,4	-0,8	-1,6	-1,5
	B ₂ Densidad de la población	Hab/ha	139	137	137	137	135	137	138	138	137	137	135
	B ₃ Cantidad total de vehículos	Ud/hab	0,72	0,74	0,75	0,76	0,78	0,77	0,76	0,76	0,76	0,75	0,76
	B ₄ Volumen total de agua suministrada Comercio	m ₃ /hab	31,27	30,95	30,21	28,86	30,17	27,10	26,85	27,51	26,51	24,93	24,19
	B ₅ Volumen total de agua suministrada Domestico	m ₃ /hab	47,76	47,62	46,82	46,60	45,94	43,35	43,39	42,94	42,76	41,74	40,93
	B ₆ Volumen total de agua suministrada Industria	m ₃ /hab	7,13	6,96	6,69	6,72	6,32	5,39	5,58	5,41	5,07	4,68	4,90
	B ₇ Volumen total de agua suministrada Otros usos	m ₃ /hab	4,86	4,94	4,95	5,49	5,60	3,80	4,83	4,66	5,12	5,39	5,30
	B ₈ RFD - Renta Familiar Disponible per capita	Índice RFD Bcn=100	137,7	138,0	139,4	136,4	138,6	140,0	138,4	140,7	139,0	139,7	140,3
	B ₉ Oferta de alojamiento	Plazas/hab	6,11E-02	6,41E-02	6,41E-02	6,44E-02	6,52E-02	7,13E-02	7,36E-02	7,27E-02	7,42E-02	7,46E-02	7,57E-02
	B ₁₀ Consumo de energía final	MWh/año. hab	13,75	14,10	14,10	15,21	15,01	13,10	13,50	13,28	13,36	13,31	13,31
	B ₁₁ Superficie locales Aparcamiento	m ₂ /hab	9,51	10,05	10,45	10,83	11,39	11,68	11,96	12,55	12,88	13,32	13,44
	B ₁₂ Superficie locales Industria	m ₂ /hab	7,46	7,30	7,04	6,77	6,60	6,27	5,93	5,84	5,40	5,27	5,29
3. Metabolismo destructivo	C ₁ Niveles medios de PM10	µg/m ₃	34	34	33	34	33	31	34	27	28,8	28	20
	C ₂ Niveles medios de NO2	µg/m ₃	40	37	49	31	47	45	41	41	32	36	32
	C ₃ Niveles medios de CO	mg/m ₃	0,7	0,5	0,4	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3
	C ₄ Volumen de recogida de fracción resto	ton/hab	4,20E-01	4,26E-01	4,14E-01	3,97E-01	4,07E-01	4,19E-01	3,98E-01	3,68E-01	3,62E-01	3,55E-01	3,46E-01
	C ₅ Accidentes de tránsito	Ud/hab	8,16E-03	8,18E-03	8,37E-03	9,10E-03	9,07E-03	7,58E-03	7,86E-03	7,81E-03	7,57E-03	7,50E-03	8,44E-03
4. Metabolismo regenerativo	D ₁ Volumen de recogida fracción papel-cartón	ton/hab	5,38E-02	6,25E-02	7,77E-02	8,50E-02	9,55E-02	9,72E-02	8,72E-02	6,43E-02	5,15E-02	4,49E-02	3,80E-02
	D ₂ Volumen de recogida fracción vidrio	ton/hab	1,86E-02	2,08E-02	2,34E-02	2,56E-02	3,01E-02	3,08E-02	3,09E-02	2,40E-02	2,44E-02	2,43E-02	2,47E-02
	D ₃ Volumen de recogida fracción envases	ton/hab	1,02E-02	1,14E-02	1,26E-02	1,41E-02	1,73E-02	1,85E-02	1,87E-02	1,55E-02	1,57E-02	1,51E-02	1,47E-02
	D ₄ Gastos de conservación Superficies de zonas y calles	Miles€/hab	5,87E-03	5,95E-03	5,29E-03	6,88E-03	7,22E-03	7,36E-03	6,60E-03	7,70E-03	7,74E-03	7,51E-03	7,58E-03
	D ₅ con prioridad peatonal	ha/hab	2,58E-05	2,54E-05	2,54E-05	2,78E-05	2,94E-05	2,42E-05	2,65E-05	2,65E-05	2,67E-05	2,67E-05	2,69E-05

Tabla 5: Valores del sistema de indicadores para el distrito de Les Corts entre 2003 y 2013. Fuente: Elaboración propia a partir de (Departament d'Estadística, 2013).

En la categoría referente al metabolismo de presión de salida, se consideran 12 indicadores que describen la presión ejercida por los subsistemas económico y social sobre el subsistema natural. En términos generales, esta categoría metabólica hace referencia a las dimensiones de la población (subsistema social) y sus volúmenes de consumo. En la

categoría de metabolismo destructivo se incluyen 5 indicadores que reflejan algunos problemas de contaminación ambiental en la ciudad, concretamente asociados a la contaminación atmosférica y a la producción de residuos sólidos urbanos. También se incluye en esta categoría los accidentes de tránsito como indicadores de la inhabitabilidad del ecosistema urbano.

Distrito			Gracia										
Tipo	Nombre del Indicador	Unidades	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
1_Soporte de entrada	A ₁ Superficie locales Vivienda	m ₂ /hab	41,39	41,59	41,48	41,28	41,84	41,37	41,10	41,48	42,17	42,17	42,63
	A ₂ Superficie locales Comercio	m ₂ /hab	3,71	3,73	3,73	3,71	3,77	3,73	3,70	3,75	3,80	3,81	3,89
	A ₃ Superficie locales Oficinas	m ₂ /hab	2,33	2,31	2,28	2,25	2,25	2,20	2,16	2,16	2,16	2,15	2,16
	A ₄ Superficie locales Educación	m ₂ /hab	0,93	0,98	1,02	1,06	1,12	1,16	1,22	1,23	1,26	1,40	1,41
	A ₅ Superficie locales Sanidad	m ₂ /hab	0,24	0,46	0,68	0,90	1,13	1,33	1,42	1,88	2,10	2,10	2,13
	A ₆ Superficie locales Deportivo	m ₂ /hab	0,58	0,59	0,59	0,60	0,62	0,62	0,66	0,59	0,62	0,70	0,70
	A ₇ Superficie locales Religioso	m ₂ /hab	0,69	0,68	0,67	0,66	0,66	0,64	0,63	0,63	0,63	0,62	0,62
	A ₈ Superficie locales Espectaculos	m ₂ /hab	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	0,16
	A ₉ Superficie locales Otros Usos Equipamientos culturales en el distrito	m ₂ /hab	0,44	0,42	0,39	0,37	0,35	0,32	0,29	0,29	0,26	0,23	0,24
	A ₁₀ Equipamientos deportivos en el distrito	Ud/hab	7,55E-05	7,55E-05	6,66E-05	4,95E-05	5,82E-05	5,73E-05	6,48E-05	7,32E-05	9,05E-05	8,20E-05	9,09E-05
	A ₁₁ Nivel de seguridad en el barrio	Ud/hab	7,30E-04	9,81E-04	9,74E-04	9,90E-04	9,99E-04	9,83E-04	1,12E-03	1,14E-03	1,00E-03	1,01E-03	1,03E-03
	A ₁₂ Fuentes publicas	Puntuación	6,4	6,3	6,4	6,6	6,4	6,7	6,7	6,7	6,8	6,9	6,6
	A ₁₃ Áreas de juegos infantiles	Ud/hab	9,06E-04	8,89E-04	8,66E-04	8,66E-04	8,82E-04	8,27E-04	8,19E-04	8,94E-04	9,13E-04	8,86E-04	8,60E-04
	A ₁₄ Paradas de Mercado activas	Ud/hab	2,35E-04	2,52E-04	2,33E-04	2,14E-04	2,16E-04	2,62E-04	2,59E-04	2,68E-04	2,96E-04	3,03E-04	3,14E-04
	A ₁₅ Arbolado viario. Unidad de arbolado	Ud/hab	6,35E-03	6,29E-03	6,05E-03	5,67E-03	5,42E-03	5,09E-03	5,00E-03	5,13E-03	5,13E-03	5,06E-03	5,12E-03
	A ₁₆ Superficie Parques Urbanos	ha/hab	5,96E-02	5,89E-02	5,84E-02	5,70E-02	5,76E-02	5,70E-02	5,66E-02	5,76E-02	6,11E-02	6,12E-02	6,13E-02
	A ₁₇ Superficie Resto de Verde Urbano	ha/hab	1,62E-04	1,62E-04	1,61E-04	1,59E-04	1,60E-04	1,58E-04	1,56E-04	1,57E-04	1,59E-04	1,58E-04	1,60E-04
	A ₁₈ Urbano	ha/hab	1,66E-04	1,64E-04	1,63E-04	1,62E-04	1,64E-04	1,63E-04	1,59E-04	1,67E-04	1,69E-04	1,72E-04	1,79E-04
2_Presión de salida	B ₁ Tasa de crecimiento natural	-	-3,8	-1,2	-2,1	-1,2	-2,0	-0,2	-1,5	-0,5	0,1	-0,9	-1,5
	B ₂ Densidad de la población	Hab/ha	282	281	284	286	284	288	291	290	287	288	289
	B ₃ Cantidad total de vehículos	Ud/hab	0,58	0,58	0,59	0,60	0,61	0,61	1,03	0,60	0,60	0,59	0,54
	B ₄ Volumen total de agua suministrada Comercio	m ₃ /hab	5,48	5,87	6,22	6,38	6,42	6,06	9,14	9,13	8,96	8,50	8,25
	B ₅ Volumen total de agua suministrada Domestico	m ₃ /hab	27,04	28,62	29,97	31,47	31,06	29,19	40,53	40,42	40,63	39,63	38,85
	B ₆ Volumen total de agua suministrada Industria	m ₃ /hab	1,44	1,41	1,37	1,54	1,27	0,89	1,33	1,18	1,17	1,12	1,16
	B ₇ Volumen total de agua suministrada Otros usos	m ₃ /hab	2,00	2,07	2,13	2,48	2,29	1,74	2,44	2,36	2,63	2,77	2,60
	B ₈ RFD - Renta Familiar Disponible per capita	Indice RFD Bcn=100	104,1	104,0	104,5	103,9	104,6	103,2	101,9	102,5	104,9	103,9	105,2
	B ₉ Oferta de alojamiento	Plazas/hab MWh/año. hab	3,78E-03	3,92E-03	3,64E-03	3,60E-03	3,64E-03	3,94E-03	3,90E-03	4,07E-03	4,07E-03	5,78E-03	7,73E-03
	B ₁₀ Consumo de energía final	hab	11,86	12,00	11,92	12,76	12,53	10,88	11,16	11,00	11,14	11,06	11,06
	B ₁₁ Superficie locales Aparcamiento	m ₂ /hab	5,18	5,36	5,51	5,63	5,86	5,95	6,08	6,25	6,48	6,69	6,79
	B ₁₂ Superficie locales Industria	m ₂ /hab	4,75	4,63	4,48	4,32	4,24	4,06	3,87	3,84	3,74	3,58	3,56
3_Metabolismo destructivo	C ₁ Niveles medios de PM10	µg/m ₃	49	50	48	49	46	40	40	33	37,4	38	26
	C ₂ Niveles medios de NO2	µg/m ₃	69	67	83	74	63	63	63	64	66	61	54
	C ₃ Niveles medios de CO	mg/m ₃	0,9	0,5	0,7	0,3	0,5	0,4	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5
	C ₄ Volumen de recogida de fracción resto	ton/hab	4,09E-01	4,03E-01	3,87E-01	3,74E-01	3,77E-01	3,85E-01	3,62E-01	3,21E-01	3,19E-01	2,89E-01	2,80E-01
	C ₅ Accidentes de tránsito	Ud/hab	5,05E-03	5,24E-03	4,97E-03	4,48E-03	4,97E-03	4,20E-03	4,65E-03	3,93E-03	4,01E-03	3,84E-03	3,69E-03
4_Metabolismo regenerativo	D ₁ Volumen de recogida fracción papel-cartón	ton/hab	3,47E-02	3,99E-02	4,81E-02	5,05E-02	5,49E-02	5,54E-02	4,98E-02	4,68E-02	3,65E-02	3,14E-02	2,53E-02
	D ₂ Volumen de recogida fracción vidrio	ton/hab	1,23E-02	1,35E-02	1,49E-02	1,56E-02	1,79E-02	1,82E-02	1,85E-02	1,79E-02	1,81E-02	1,78E-02	1,71E-02
	D ₃ Volumen de recogida fracción envases	ton/hab	6,51E-03	7,06E-03	7,68E-03	8,24E-03	9,76E-03	1,03E-02	1,05E-02	1,13E-02	1,12E-02	1,07E-02	9,89E-03
	D ₄ Gastos de conservación Superficies de zonas y calles con prioridad peatonal	Miles€/hab	4,12E-03	4,84E-03	3,83E-03	5,05E-03	5,24E-03	5,32E-03	5,43E-03	5,55E-03	5,62E-03	5,43E-03	5,48E-03
	D ₅ con prioridad peatonal	ha/hab	3,11E-05	2,94E-05	2,91E-05	4,21E-05	4,24E-05	4,18E-05	4,21E-05	4,31E-05	4,36E-05	4,43E-05	4,46E-05

Tabla 6: Valores del sistema de indicadores para el distrito de Gracia entre 2003 y 2013. Fuente: Elaboración propia a partir de (Departament d'Estadística, 2013).

3.1.2 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

El método de componentes principales (Härdle & Simar, 2015) es un procedimiento matemático que se usa para transformar las relaciones que presentan un conjunto de datos. Específicamente, es una transformación ortogonal en la cual el conjunto inicial de datos correlacionados se describe mediante un conjunto de variables linealmente independientes. Técnicamente se realiza mediante la solución del problema de autovalores de la matriz de correlaciones de los datos. Los autovectores que satisfacen el problema de autovalores son

tales que, el primer autovector describe la mayor varianza posible (de los datos), y cada autovector sucesivo tiene la mayor varianza posible tras la otorgada a los autovectores previos. A estos autovectores se les denomina componentes principales (Husson, Le, & Pages, 2011). Para realizar este análisis se ha empleado el software “R” (R Core Team, 2014).

Con esta técnica se redujo la dimensionalidad del conjunto de datos o indicadores a tres componentes principales que están describiendo el 82,7% de variabilidad. A continuación se presentan los resultados para las tres componentes principales.

3.1.3 COMPONENTE 1: FONDO SOCIAL – DIVERSIDAD DE USOS

Esta componente, denominada de **fondo social**, explica el 38,9% de la variabilidad y separa los distritos de Ciutat Vella y Les Corts, los cuales se caracterizan por una **tipología** diferente **en términos de función** (usos). Por un lado, Ciutat Vella es un distrito de **servicios comunitarios** para la ciudad en general, tiene un importante desempeño en los indicadores asociados a superficie de locales de espectáculos, locales religiosos, de zonas peatonales, paradas de mercados y equipamientos culturales, entre otros. Por el contrario, Les Corts, que es un distrito mayoritariamente residencial; se caracteriza por una mayor superficie de locales deportivos,, mayor cantidad de vehículos y una renta mas alta, entre otras características. Por lo tanto, ambos distritos estarán diferenciados por la cantidad y calidad de **interacciones sociales asociadas a la diversidad/no diversidad de usos**.

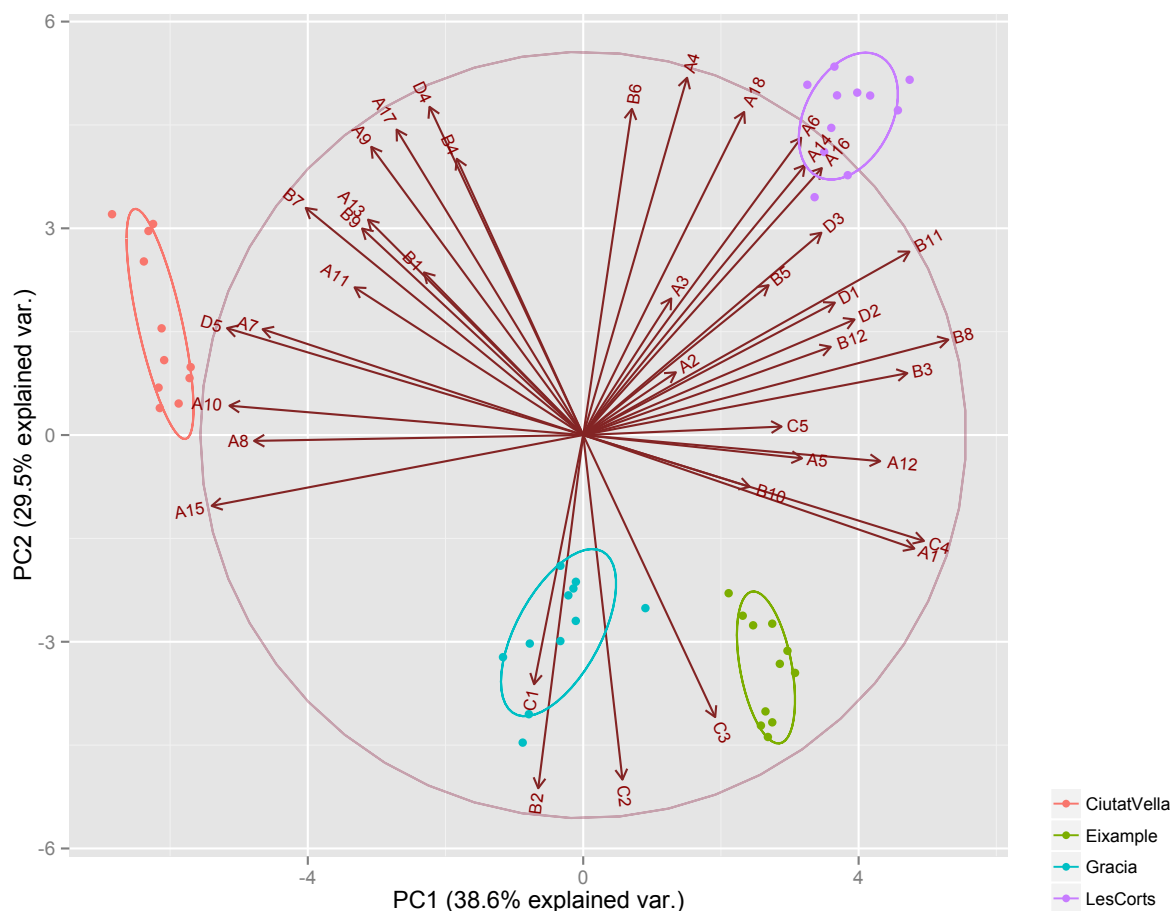


Figura 10: Resultados del análisis de componentes principales. Gráfica biplot (individuos y variables) de las componentes principales 1 y 2.

3.1.4 COMPONENTE 2: FONDO ECOLÓGICO

Este componente, denominado de **fondo ecológico**, explica el 29,5% de la variabilidad y esta relacionado directa e indirectamente con la **estructura ecológica** existente en cada distrito. Como se observa en la Figura 11 este componente marca una división entre dos “Barcelonas”; Eixample y Gracia (a la izquierda) y Les Corts y Ciutat Vella (a la derecha). Les Corts y en menor medida Ciutat Vella, presentan un buen desempeño en indicadores relacionados con la **calidad del espacio público y las zonas verdes y de recreación**. Concretamente en los indicadores de; superficie de parques, superficie de verde urbano, superficie de educación, superficie de locales deportivos, áreas de juegos infantiles y arbolado viario, entre otros. Como es de esperarse, estos indicadores aparecen inversamente correlacionados con los indicadores de contaminación atmosférica que están describiendo a los distritos de l'Eixample y Gracia en este componente (niveles medios de PM10, niveles medios de NO2 y niveles medios de CO). Por lo tanto, Eixample y Gracia presentan un mayor **flujo de contaminantes**, relacionando a una alta densidad poblacional, como se observa con el indicador (B2), y a la falta de zonas verdes y de esparcimiento (indicadores a la derecha en la Figura 11).

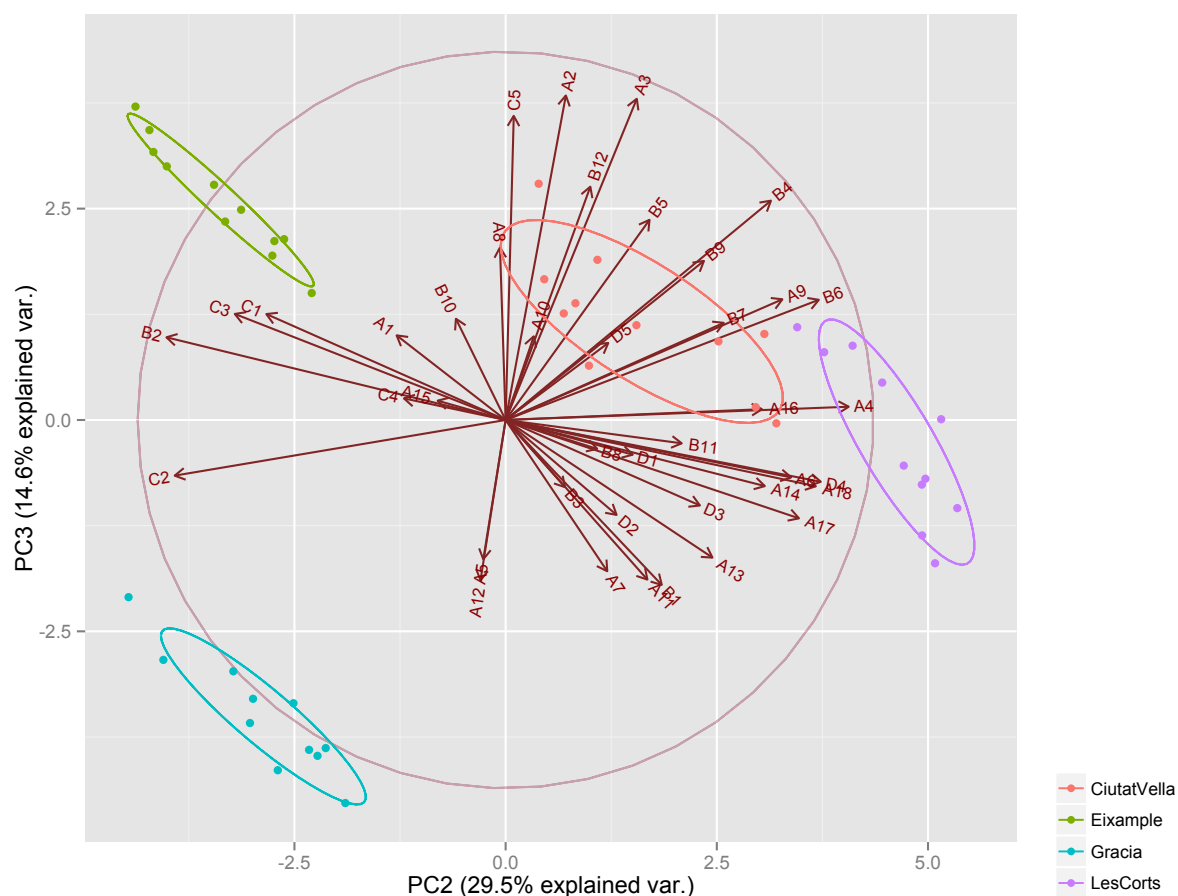


Figura 11: Resultados del análisis de componentes principales. Gráfica biplot (individuos y variables) de las componentes principales 2 y 3.

3.1.5 COMPONENTE 3: FONDO ESTRUCTURAL / FORMAL

El tercer componente, denominado de **forma o estructura**, explica un 14,6% de variabilidad. Este componente hace una separación entre Eixample y Gracia, dicha separación esta marcada principalmente por mayores superficies de; oficinas, comercio e industria en el Eixample. Por lo tanto, y teniendo en cuenta la **forma urbana** y las dimensiones de ambos distritos, esta componente esta relacionada con la **tipología**

estructural (calles, tamaño de manzanas...) y **arquitectónica**. Así, el Eixample que presenta una estructura urbana ortogonal, de grandes dimensiones y una tipología edificatoria en altura, facilita la cohabitación de usos de grandes superficies.

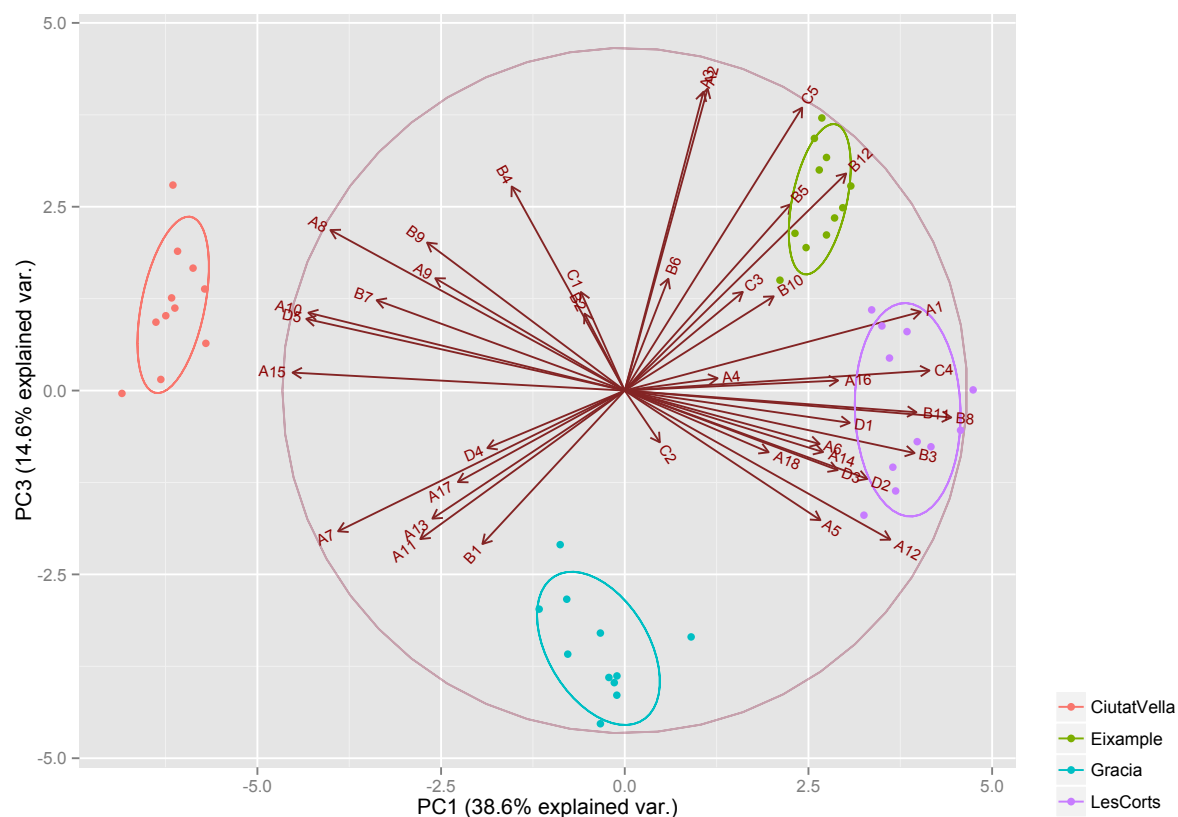


Figura 12: Resultados del análisis de componentes principales. Gráfica biplot (individuos y variables) de las componentes principales 1 y 3.

3.1.6 DIVERSIDAD METABÓLICA

Los tres componentes principales están describiendo el 82,7% de variabilidad, con lo cual el método de componentes principales resulta adecuado en la descripción de los cuatro distritos de Barcelona. Debido a las características del caso de estudio, es posible hacer una lectura de la evolución de los diferentes distritos en el periodo de estudio (2003 – 2013). Igualmente una lectura del tipo de metabolismo correspondiente a cada distrito de acuerdo a su localización en las gráficas que incluyen los vectores de los indicadores. Por ejemplo, si se observa la Figura 12, Les Corts está caracterizado por un metabolismo de presión, debido a una alta tasa de crecimiento natural, una mayor cantidad de vehículos y una renta mayor, comparativamente. Por su parte, el Eixample presenta un metabolismo de presión-destructivo (Ver Figuras 11 y 12) con valores altos en la superficie de industria, en el volumen de agua de uso residencial, en la cantidad de accidentes de tránsito y en los indicadores de contaminación atmosférica, comparativamente.

En general, este método de análisis estadístico deja en evidencia la diversidad en el caso de estudio, las diferentes “Barcelonas”. Esta evidencia abre algunos debates asociados al **concepto de diversidad aplicado en el contexto urbano**, a la **escala apropiada en los estudios urbanos**, al **escalamiento de ciertos indicadores** en relación con el tamaño de los sistemas urbanos y al **concepto de sostenibilidad** empleado de forma determinista en los sistemas urbanos.

4 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

En el marco de la ecología urbana se desarrollan diferentes modelos, indicadores y métodos de análisis de la sostenibilidad urbana. Cada uno de los planteamientos hace referencia a criterios e indicadores particulares establecidos por los diferentes autores y que analizan los elementos del ecosistema urbano de forma independiente. Sin embargo, hasta ahora no se ha desarrollado una medida de diversidad que integre el análisis de los flujos metabólicos, las funciones urbanas y la estructura urbana, como herramienta para evaluar el ecosistema urbano en el marco de la sostenibilidad.

4.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una medida de la diversidad que describa la complejidad del ecosistema urbano y permita valorar su robustez entendida como tendencia hacia el desarrollo sostenible. Esta medida debería incluir el análisis temporal del desarrollo urbano, descrito por la forma, escala y tamaño de los sistemas urbanos, de su metabolismo y de su diversidad funcional.

4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Hacer una aproximación teórica al sistema urbano basada en la ecología urbana y en la teoría de los sistemas complejos.
- Establecer las relaciones entre diversidad-complejidad, diversidad-robustez y complejidad-sostenibilidad con base a la aproximación conceptual desde la ecología urbana y la teoría de los sistemas complejos.
- Introducir una medida de diversidad en el análisis del ecosistema urbano teniendo en consideración métodos matemáticos tales como la entropía de la información (Shannon, 1948) la diversidad de Wietzman (Page, 2011), el método de máxima entropía (Harte, 2011) y el análisis de componentes principales.
- Aplicar la medida de la diversidad en casos de estudio, estableciendo mediante técnicas estadísticas los indicadores apropiados.

5 METODOLOGÍA

5.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

La metodología propuesta para desarrollar el plan de investigación se estructura en seis etapas que se detallan a continuación. La primera etapa hace referencia a la revisión bibliográfica referente a los conceptos, indicadores y modelos que describen el sistema urbano desde las aproximaciones de la ecología urbana, la ciencia de los sistemas complejos y la sostenibilidad. En esta etapa se identifican algunos modelos de análisis urbano que emplean la diversidad como indicador y base metodológica. En la segunda etapa se plantea establecer las relaciones entre diversidad-complejidad, diversidad-robustez y complejidad-sostenibilidad, tomando como referencia las propuestas de los autores que han trabajado recientemente estos conceptos. En esta etapa se plantea realizar la construcción conceptual de la diversidad aplicada al ecosistema urbano.

En la tercera etapa se plantea introducir la medida de diversidad aplicando y tomando como referencia los modelos y métodos matemáticos estudiados y a estudiar tales como la entropía de la información (Shannon, 1948), el análisis de componentes principales, la diversidad de Wietzman (Page, 2011) y el método de máxima entropía (Harte, 2011). Para su aplicación, se requiere la definición del caso de estudio, que constituye la cuarta etapa, para ello se plantea hacer una recopilación de los datos disponibles y un análisis de la pertinencia de los indicadores en la descripción de diversidad. Seguidamente, en la quinta etapa, se propone la aplicación de las medidas o métodos de diversidad en el caso de estudio, mediante el proceso de cálculo, de verificación, de mapeo y de procesamiento de resultados. Después, se realizará el análisis de los resultados. Finalmente, en la sexta etapa, se plantea la escritura y publicación del trabajo realizado, que incluye la escritura del documento final de tesis.

5.2 CASO DE ESTUDIO

Actualmente, se ha trabajado en los siguientes distritos de Barcelona como caso de estudio; Ciutat Vella, Eixample, Les Corts y Gracia. Se han escogido estos distritos iniciales de estudios teniendo en cuenta cuatro criterios principales; la morfología urbana, las características sociales, las características económicas y el tipo de desarrollo, planificado y no planificado, que presenta cada distrito.

La ciudad de Barcelona tiene una superficie de 10.216 hectáreas, una población de 1'620.943 habitantes en 2012 y una densidad de 159 hab/ha (Departament d'Estadística, 2013). Se divide administrativamente en diez distritos, que a su vez se subdividen en un total de 73 barrios. Los distritos de Ciutat Vella y l'Eixample, conforman el núcleo urbano e histórico de Barcelona. El distrito de Ciutat Vella tiene una superficie de 436,8 ha, esta conformado por cuatro barrios; el Raval (1), el Gòtic (2), la Barceloneta (3) y Sant Pere, Santa Caterina i la Ribera (4), y cuenta con una población total de 104.442 habitantes. El distrito de l'Eixample tiene una superficie de 747,6 hectáreas, lo conforman seis barrios; el Fort Pienc (5), la Sagrada Família (6), la Dreta de l'Eixample (7), l'Antiga Esquerra de l'Eixample (8), la Nova Esquerra de l'Eixample (9) y Sant Antoni (10), y cuenta con una población de 265.828 habitantes. El distrito l'Eixample, es el mas denso de la ciudad, presentan una densidad poblacional de 356 hab/ha (Departament d'Estadística, 2013).

Alrededor del distrito de l'Eixample se encuentran los distritos de Les Corts y Gracia, anexados a la ciudad en la última década del siglo XIX. Anteriormente fueron antiguos municipios independientes, municipio de Les Corts de Sarrià y Vila de Gracia, que tras un

proceso de conurbación fueron incluidos en la municipalidad de Barcelona. El distrito de Les Corts tiene una superficie de 601,8 hectáreas, esta conformado por tres barrios; les Corts (19), la Maternitat i Sant Ramon (20) y Pedralbes (21), en total cuenta con una población de 82.420 habitantes. El distrito de Gràcia cuenta con una superficie de 418,6 hectáreas, esta compuesto por cinco barrios; Vallcarca i els Penitents (28), el Coll (29), la Salut (30), la Vila de Gràcia (31) y el Camp d'en Grassot i Gràcia Nova (32), tiene un total de 121.926 habitantes. Gracia, tiene una densidad poblacional de 291 hab/ha, y es el segundo distrito mas denso, después de l'Eixample (Departament d'Estadística, 2013).



Figura 13: Mapa del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

De esta forma, el área de estudio, que incluye los cuatro distritos, tiene una superficie de 2.204,8 hectáreas, equivalente al 22% de la superficie de la ciudad. Con respecto a la población, el área de estudio comprende un total de 574.616 habitantes, que representan el 35% de la población de la ciudad. Por lo tanto, se considera como una muestra representativa, tanto de la estructura urbana como del tejido social, elementos que condicionan los flujos materiales, energéticos e informacionales en el ecosistema urbano.

En este trabajo, es de interés analizar la diversidad como indicador en la ciudad de Barcelona, por la disponibilidad de datos cartográficos y estadísticos de diferentes indicadores demográficos, territoriales, sociales, económicos y de servicios urbanos. Aunque el caso y escala de estudio de esta investigación se definirá de forma concreta dependiendo de la disponibilidad de información, se propone Bogotá como caso de estudio comparado.

6 PLAN DE INVESTIGACIÓN Y CONTRIBUCIONES ESPERADAS

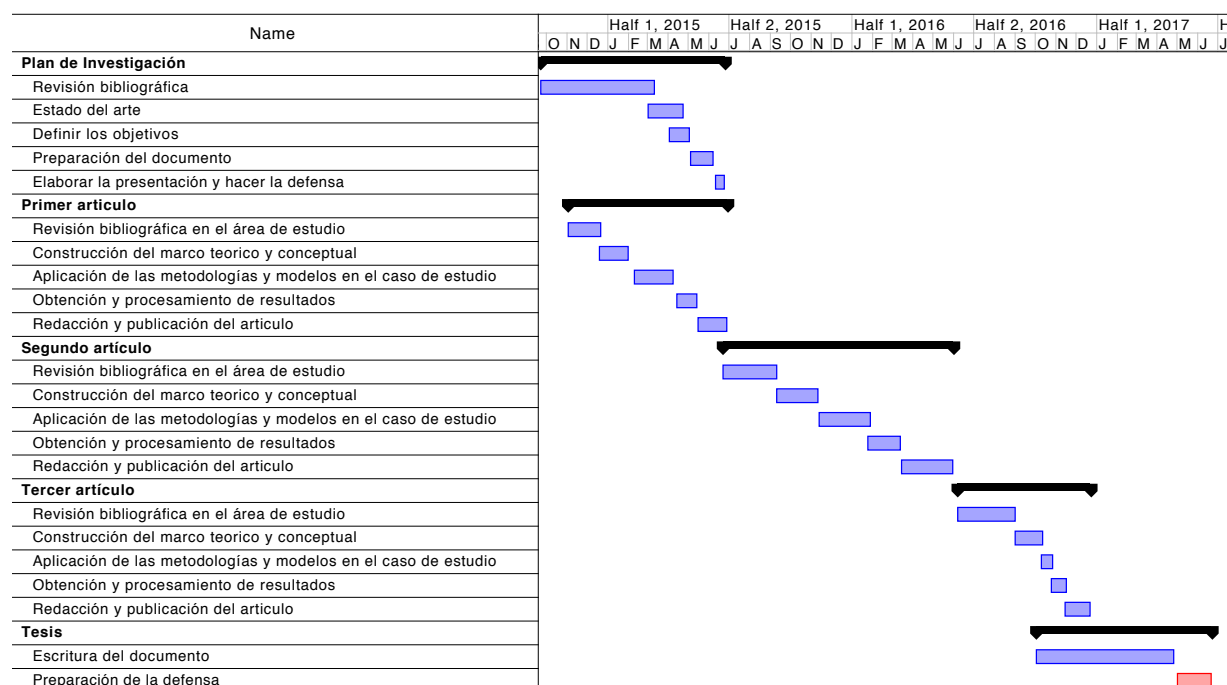
La primera contribución hace referencia a la publicación de los resultados obtenidos en la aproximación a la diversidad de Barcelona a partir del análisis de componentes principales, descritos en el apartado 3. La descripción metodológica, las observaciones y los resultados detallados del análisis de componentes principales en el conjunto de datos de cuatro distritos de Barcelona, serán publicados como el primer artículo de la investigación doctoral.

- “The many Barcelonas. A multivariate analysis approach to assess diversity in urban context.”. Trabajo en preparación para el envío a la revista: Landscape and Urban Planning.

En cuanto a la segunda contribución, se propone ampliar el caso de estudio a los 10 distritos de Barcelona para validar la efectividad de la metodología como indicador de la diversidad urbana y obtener conclusiones que aporten argumentos en los debates de diversidad y sostenibilidad. En esta fase de la investigación se contempla el análisis espacial mediante el mapeo en el territorio de los resultados del análisis de componentes principales empleando sistemas de información geográfica.

La tercera contribución será la comparación entre las medidas de diversidad estudiadas tales como la entropía de la información (Shannon, 1948), el análisis de componentes principales, la diversidad de Wietzman (Page, 2011) y el método de máxima entropía (Harte, 2011), para establecer la pertinencia de dichas medidas en la descripción de la diversidad urbana.

A continuación se presenta una estimación del cronograma para cumplir con las contribuciones esperadas desarrollando la metodología anteriormente descrita.



7 REFERENCIAS

- Agencia de Ecología Urbana de Barcelona. (2010). *Sistema Municipal de Indicadores de Sostenibilidad*. Madrid.
- Arcaute, E., Hatna, E., Ferguson, P., Youn, H., Johansson, A., & Batty, M. (2015). Constructing cities , deconstructing scaling laws, (i), 3–6. doi:10.1098/rsif.2014.0745
- Batty, M. (2008). The size, scale, and shape of cities. *Science (New York, N.Y.)*, 319(5864), 769–771. doi:10.1126/science.1151419
- Batty, M. (2012). Building a science of cities. *Cities*, 29(SUPPL. 1), S9–S16. doi:10.1016/j.cities.2011.11.008
- Bettencourt, L. M. a. (2013). The origins of scaling in cities. *Science*, 340(6139), 1438–41. doi:10.1126/science.1235823
- Bettencourt, L. M. a, & West, G. (2010). A Unified Theory of Urban Living. *Nature*, 465(7318), 912–913.
- Bettencourt, L. M. A., Lobo, J., Helbing, D., Ku, C., & West, G. B. (2007). Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities.
- Bettini, V. (1998). *Elementos de ecología urbana*. Madrid: Editorial Trotta.
- Departament d'Estadística. (2013). Anuarios Estadísticos de la Ciudad de Barcelona.
- Fariña, J. (1995). Cálculo de la entropía producida en diversas zonas de madrid. *Cuadernos de Investigación Urbanística*, 10.
- Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X., & Briggs, J. M. (2008). Global change and the ecology of cities. *Science (New York, N.Y.)*, 319(5864), 756–760. doi:10.1126/science.1150195
- Härdle, W. K., & Simar, L. (2015). *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Harte, J. (2011). *Maximum Entropy and Ecology. A Theory of Abundance, Distribution, and Energetics*. New York: Oxford University Press.
- Higuera, E. (1998). Urbanismo bioclimático. Criterios medioambientales en la ordenación de asentamientos. *Cuadernos de Investigación Urbanística*, 24.
- Husson, F., Le, S., & Pages, J. (2011). Principal Component Analysis (PCA). In *Exploratory Multivariate Analysis by Example Using R* (pp. 1 – 59). Boca Raton: CRC Press.
- Kennedy, C., Cuddihy, J., & Engel-yan, J. (2007). The Changing Metabolism of Cities. *Journal of Industrial Ecology*, 11(2), 43 – 59.
- Kennedy, C., Pincetl, S., & Bunje, P. (2011). The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design. *Environmental Pollution*, 159(8-9), 1965–1973. doi:10.1016/j.envpol.2010.10.022

- Lin, Z., & Xia, B. (2013). Sustainability analysis of the urban ecosystem in Guangzhou City based on information entropy between 2004 and 2010. *Journal of Geographical Sciences*, 23(3), 417–435. doi:10.1007/s11442-013-1019-5
- Margalef, R. (1991). *Teoría de los sistemas ecológicos*. Barcelona: Publicacions de la Universitat de Barcelona.
- Mohajeri, N., French, J. R., & Batty, M. (2013). Evolution and entropy in the organization of urban street patterns. *Annals of GIS*, 19(1), 1–16. doi:10.1080/19475683.2012.758175
- Mohajeri, N., & Gudmundsson, A. (2012). Entropies and scaling exponents of street and fracture networks. *Entropy*, 14(4), 800–833. doi:10.3390/e14040800
- Newman, P. W. G. (1999). Sustainability and cities: Extending the metabolism model. *Landscape and Urban Planning*, 44(4), 219–226. doi:10.1016/S0169-2046(99)00009-2
- Page, S. (2011). *Diversity and Complexity*. New Jersey: Princeton University Press.
- R Core Team. (2014). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Retrieved from <http://www.r-project.org/>
- Rueda, S. (2007). *Barcelona, ciudad mediterránea, compacta y compleja. Una visión de futuro más sostenible*. (Ayuntamiento.). Barcelona.
- Salazar, L. (2014). *Análisis de la sostenibilidad urbana mediante entropía de la información. Aplicación en los distritos de Ciutat Vella, l'Eixample, Les Corts y Gracia. (Trabajo de Fin de Máster)*. Barcelona.
- Shannon, C. E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *The Bell System Technical Journal*, 27(3), 379 – 423.
- United Nations. (1987). *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*.
- United Nations Population Division. (2014). *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision*. New York.
- Wolman, A. (1965). The metabolism of cities. *Scientific American*, 213(2), 179 – 190.
- Wu, J. (2014). Urban ecology and sustainability: The state-of-the-science and future directions. *Landscape and Urban Planning*, 125, 209–221. doi:10.1016/j.landurbplan.2014.01.018
- Zhang, Y. (2013). Urban metabolism: A review of research methodologies. *Environmental Pollution*, 178, 463–473. doi:10.1016/j.envpol.2013.03.052
- Zhang, Y., Yang, Z., Fath, B. D., & Li, S. (2010). Ecological network analysis of an urban energy metabolic system: Model development, and a case study of four Chinese cities. *Ecological Modelling*, 221(16), 1865–1879. doi:10.1016/j.ecolmodel.2010.05.006
- Zhang, Y., Yang, Z., & Li, W. (2006). Analyses of urban ecosystem based on information entropy. *Ecological Modelling*, 197(1-2), 1–12. doi:10.1016/j.ecolmodel.2006.02.032