

Dispersión y Escalamiento Urbano en el Sistema de Ciudades Chileno

Urban Sprawl and Scaling in the Chilean Cities System

Cristián Henríquez¹, Cindy Mallea², Lenin Henríquez-Dole³, Horacio Samaniego⁴

Resumen

La expansión espacial incesante de las ciudades, el aumento de la segregación socio-espacial y el aumento del nivel de emisiones afectan severamente al medio ambiente y conforman estructuras emergentes e insustentables. El enfoque de los sistemas complejos, la ecología urbana y la ecología del paisaje nos ayudan comprender algunas de las propiedades de este crecimiento urbano. Para ello, se estudia la dispersión del paisaje urbano de 43 ciudades y conglomerados urbanos chilenos, entre 1993, 2003 y 2011, utilizando distintas métricas del paisaje urbano: fragmentación, elongación y aislamiento, en base a coberturas del Observatorio Urbano (MINVU) y al procesamiento en el programa Fragstat. También, se realiza un escalamiento del tamaño de las ciudades según el nivel de emisiones de CO₂ de manera exploratoria. Los resultados muestran que Santiago presenta los mayores porcentajes de fragmentación y el máximo crecimiento, junto con las ciudades Arica y Calama; la mayor parte experimentan procesos de elongación (Los Ángeles, Chillán e Iquique) y gran parte aumentan su aislamiento (Illapel, San Antonio y Copiapó). Por su parte, el escalamiento de las emisiones presenta un comportamiento sublineal (0,8). Los datos exhiben una alometría heterogénea que dependen estrechamente de la calidad de los datos utilizados, transitando de un modelo de ciudad relativamente compacto a uno difuso y disperso. Los métodos de simulación espacial de la dispersión y de escalamiento pueden servir como *proxy* para evaluar la sustentabilidad urbana, en la medida que ayudan a determinar la tendencia global de urbanización y pronosticar cómo evolucionarían los sistemas urbanos.

Palabras clave: Sustentabilidad urbana, dispersión urbana, sistemas complejos, Fragstat.

Abstract

Incessant spatial expansion of cities, the increasing socio-spatial segregation, and rising levels of emissions severely affect the underlying environment and generate emerging and unsustainable structures. The approach of complex systems, urban ecology and landscape ecology helps us to understand some of the properties of this urban growth. In order to do this, the urban landscape fragmentation of 43 Chilean urban systems were calculated, between 1993, 2003 and 2011, using landscape metrics: fragmentation, elongation and isolation. Spatial layers of the Urban Observatory (MINVU) were processed in Fragstat program. Also, a scaling of the cities according to the level of CO₂ emissions is carried out in an exploratory way. The results show that Santiago presents the highest percentages of fragmentation and maximum growth, along with the cities Arica and Calama; most of the cities undergo elongation processes and most of them increase their isolation (Illapel, San Antonio and Copiapó). On the other hand, the scaling of the emissions presents sublineal pace (0,8). The data show a heterogeneous allometry that depends very closely on the quality of the data used, moving from a model city relatively compact to a diffuse and disperse one. The spatial simulation methods of urban sprawl and urban scaling can be useful as a proxy of urban sustainability, aiding to determine the global trends of urban sprawl and forecasts how will be the evolution of the urban systems.

Keywords: Urban sustainability, urban sprawl, complex system, Fragstat.

Recibido el 11 de julio de 2017, aceptado el 27 de octubre de 2017

1 Pontificia Universidad Católica de Chile. Instituto de Geografía, investigador asociado Centro CEDEUS y Centro de Cambio Global UC. Av. Vicuña Mackenna 4860, Teléfono (56-2) 23544718. E-mail: cghenriq@uc.cl

2 Pontificia Universidad Católica de Chile. Instituto de Geografía.

3 Pontificia Universidad Católica de Chile. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.

4 Universidad Austral de Chile. Instituto de Conservación, Biodiversidad & Territorio.

Este artículo se inserta en el Proyecto Fondecyt No 1161280 y en CEDEUS CONICYT/FONDAP 15110020

Introducción

La expansión espacial incesante de las ciudades, el aumento de la segregación socio-espacial y del nivel de emisiones afectan severamente al medio ambiente llevando a los sistemas urbanos hacia estructuras emergentes e insustentables. En general, junto al crecimiento se observa un aumento de la complejidad socioeconómica y demográfica y una disminución de su heterogeneidad ecológica. Esto se debe tanto a las dinámicas propias de la ecología como por causas socio-económicas y culturales, de tal manera que a cada segmento social le corresponde un tipo de calidad ambiental, generalmente en beneficio de los sectores más ricos y en menoscabo de los más pobres. Los enfoques de los sistemas complejos, la ecología urbana y la ecología del paisaje nos ayudan a comprender mejor algunas de las propiedades de este crecimiento urbano y sus tendencias futuras.

Por un lado, una forma novedosa de entender este proceso de urbanización es a través de la perspectiva del análisis de los sistemas complejos, entendiendo que las ciudades se pueden ser descritas a través de leyes invariantes a la escala similar a los sistemas biológicos. Batty (2013) denomina este nuevo enfoque como la nueva ciencia de las ciudades y permite establecer un puente entre los enfoques tradicionales de la geografía con los sistemas complejos-adaptativos. Recientes estudios (Bettencourt, 2013; Bettencourt, Lobo, Helbing, Kuehnert y West, 2007) han demostrado regularidades estadísticas entre ciudades de distinto tamaño y de distintas condiciones económicas, sociales y políticas. De esta forma, si se analizan los cambios de indicadores urbanos se observan

que estos ocurren en una forma consistente y regular haciendo que las grandes ciudades sean versiones escaladas de las más pequeñas. Una manera de comprender esto es observando el número de ciudades en un país; estas siempre se encuentran en una progresión geométrica inversa de su tamaño. Esta relación de escalamiento es particular a los sistemas complejos, los que exhiben un comportamiento de relaciones no lineales entre los atributos que los componen, ya sea en su organización espacial o durante su desarrollo temporal (Pumain, 2004).

Por su parte, el enfoque de la ecología urbana corresponde a una vertiente de la ecología humana que pretende analizar las características y problemas de la ciudad como ecosistema (Sukopp, 1998). De acuerdo (Pickett, Cadenasso, Childers, McDonnell y Zhou, 2016, el alcance de la ecología urbana se puede entender bajo la óptica de la ecología en la ciudad, ecología tradicional aplicada en las áreas urbanas, ecología de la ciudad, como sistema socio-ecológico, por ejemplo, el metabolismo de la ciudad, la dinámica de parches, los efectos ecológicos del cambio de uso del suelo, la distribución espacial de recursos y población, entre otros; y ahora surge el concepto de ecología para la ciudad, como paradigma más holístico de la sustentabilidad urbana.

En tercer término, la ecología del paisaje aplicada en los estudios urbanos se ha ido transformando en un enfoque y herramienta integradora cada vez más útil, especialmente para abordar los complejos procesos de segregación socio espacial y los patrones espaciales de urbanización pasados y futuros, por ejemplo usando la modelación espacial para evaluar escenarios futuros (Henríquez, 2014).

Considerando este marco de referencia de la ecología urbana y los sistemas complejos, el propósito de esta comunicación es evaluar la dispersión del paisaje urbano y del escalamiento urbano del CO₂ de 43 sistemas urbanos chilenos, de manera de aportar a la discusión de la ecología para la ciudad (Pickett et al., 2016) y de la sustentabilidad de la ciudad (Wu, 2014).

Materiales y métodos

La metodología comprende dos partes: en la primera se calculan los indicadores de ecología del paisaje y la segunda el nivel de escalamiento del sistema urbano chileno. El área de estudio corresponde a 43 ciudades y conglomerados urbanos chilenos, para lo cual se descargan las coberturas de suelo urbano o mancha urbana del Observatorio Urbano del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), para los años 1993, 2003 y 2011.

Es importante mencionar que el estudio se basó en la clasificación urbana entregada por el MINVU, a través de las coberturas (shapes) para los tres años, en particular usando los campos Sistema Urbano y Conglomerado Urbano. Estos identifican a un conjunto de localidades conurbadas o proceso de conurbación en función de su cercanía y relaciones funcionales. Estos conglomerados y ciudades están conformados por un conjunto de superficies de uso urbano o parches homogéneos menores que se asignan a una única entidad urbana, que se considera como la unidad de análisis del estudio.

Métricas del paisaje

La ecología del paisaje es entendida como el estudio de los patrones espaciales del paisaje como producto de los procesos

sociales y ecológicos. Entre otros aspectos, se ha articulado la descripción de los patrones del paisaje utilizando tres elementos básicos: parches, corredores y la matriz. Los parches se definen como una porción de la superficie de carácter no lineal, diferente en apariencia y textura a las superficies que lo circunda llamada matriz (Dramstad, Olson y Forman, 1996; Forman & Godron, 1986; Frohn, 1998). Considerando la propuesta de Aguilera (2010) se han seleccionado métricas del paisaje que representen los fenómenos de fragmentación, elongación (forma/compacidad) y proximidad (aislamiento/compacidad) urbana. Para ello se calcularon los siguientes índices en el programa Fragstat 4.2 (McGarigal & Marks, 1995): número de parches y fragmentos promedio (NP y AREA_MN), compacidad promedio y forma promedio (GYRATE_MN y SHAPE_MN) y proximidad y distancia promedio (PROX_MN y ENN_MN), respectivamente (tabla 1). Así, por ejemplo, un aumento del número de fragmentos o parches (NP), junto con una disminución del tamaño medio (AREA_MN), podrían indicar un mayor grado fragmentación o dispersión, que podría ser indicativa de un patrón de urbanización. Este patrón se define como la “aparición de formas urbanas con una función preferentemente residencial, con predominio de las tipologías residenciales dispersas en las que la vivienda unifamiliar y la baja densidad urbana son características” (Aguilera, 2010, p.19). Este patrón representa muy bien el modelo actual de crecimiento de la ciudad metropolitana latinoamericana, descrito por varios autores (Bähr & Mertins, 1981; Borsdorf, 2000; Griffin & Ford, 1980; Hidalgo, Borsdorf, Zunino y Álvarez, 2008), que se caracteriza por el masivo uso del automóvil particular y por una marcada segregación entre grupos sociales.

Tabla 1

Métricas del paisaje urbano utilizadas. Fuente: adaptado de Aguilera (2010)

Table 1

Metrics of the urban landscape. Source: adapted from Aguilera (2010)

Nombre	Métrica	Descripción	Proceso
Número de parches	$NP = n_i$	Cambio en el n° de parches o fragmentos	
Parches promedio	$AREA_MN = \frac{a_{ij}(\frac{1}{10000})}{\frac{\sum_{j=1}^n X_{ij}}{n_i}}$	Cambio en el tamaño medio de los parches	Dispersión
Compacidad promedio	$GYRATE_MN = \frac{\sum_{r=1}^z h_{ijr}}{z}$	Cambio en la forma de parches	
Forma promedio	$SHAPE_MN = \frac{\frac{2SP_{ij}}{a_{ij}}}{\frac{\sum_{j=1}^n X_{ij}}{n_i}}$	Cambio en la forma/elongación de los parches	Elongación
Proximidad promedio	$PROX_MN = \frac{\sum_{s=1}^n \frac{a_{ijs}}{h_{ijs}}}{\frac{\sum_{j=1}^n X_{ij}}{n_i}}$	Cambio en el índice de proximidad de los parches	
Distancia promedio	$ENN_MN = \frac{h_{ij}}{\frac{\sum_{j=1}^n X_{ij}}{n_i}}$	Cambio en la distancia media de un parche más cercano	Proximidad

Escalamiento urbano

Respecto al escalamiento se construye una base de datos para los mismos 43 sistemas urbanos, considerando los datos de población urbana del censo de población y vivienda año 2002, según el Instituto Nacional de Estadística (INE), 2005 y el inventario de emisiones de CO₂ proveniente de la base Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC) del Ministerio de Medio Ambiente (MMA), 2017, año 2005, a nivel de comuna. Luego se estima la regresión lineal entre ambas variables transformadas (log¹⁰) utilizando el método de los cuadrados mínimos. Se determina así la pendiente de la recta que corresponde al exponente

de escalamiento β , así como el intercepto del modelo. Esto permite establecer si la relación entre la emisión de CO₂ y el tamaño de la ciudad presenta una relación lineal ($\beta \approx 1$), superlineal ($\beta > 1$) o sublineal ($\beta < 1$). Más detalles metodológicos del escalamiento y fórmula utilizada se pueden consultar en Bettencourt (2013) y Arcaute et al. (2014).

Resultados

La evolución del crecimiento de la superficie urbana de las 43 ciudades y conglomerados urbanos, entre los años 1993-2011, se aprecia en la figura 1. Sin duda la capital del país Santiago, destaca como la metrópoli más importante, con una superficie por sobre las

70 mil hectáreas. Le siguen las metrópolis de Valparaíso y Concepción con un área por sobre las 10 mil hectáreas. El resto de las ciudades se pueden considerar de tamaño medio o pequeño. En términos porcentuales las ciudades que más han

crecido son: Curicó, Rengo, San Fernando y Puerto Montt, con valores superior al 200% respecto al año 1993, mientras que las ciudades que menos han crecido son Coyhaique y Puerto Natales, con una variación porcentual bajo el 40%.

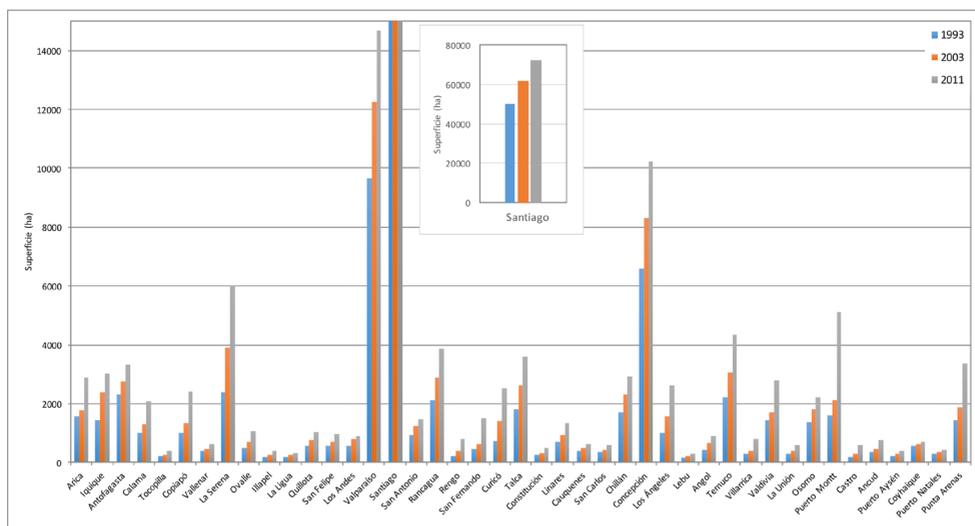


Figura 1. Cambio en la superficie urbana de ciudades chilenas entre 1993 y 2011. Fuente: Elaboración propia (2017)

Figure 1. Urban land use change of Chilean cities between 1993 and 2011. Source: Own elaboration (2017)

Métricas del paisaje urbano

Los valores de las 6 métricas del paisaje urbano del sistema de ciudades se aprecian en la tabla 2. Respecto al proceso de dispersión o fragmentación, como se señaló, corresponde a un aumento en el número de parches urbanos y una disminución de su tamaño. En este sentido se observa que el sistema urbano de Puerto Montt-Puerto Varas es el más disperso en estos 18 años, pasando de 36 parches a casi 130 parches (tabla 2 y figura 2), es decir es la segunda ciudad con más parches luego de Santiago, y a la vez es la ciudad que más ha disminuido el tamaño medio de sus fragmentos. Como se mencionó en la metodología, los conglomerados

urbanos están compuestos por un conjunto de parches urbanos, en el caso del Sistema Urbano Puerto Montt está compuesto por las localidades de Puerto Montt, Los Alerces, Puerto Varas, Nueva Braunau y otros parches menores, correspondientes a una sola unidad funcional urbana o conglomerado urbano. Si bien el año 1993 no existía esta conurbación para el año 2011 sí aparece identificada (figura 3). Esta situación también se repite en otras conurbaciones del país.

Por el contrario, Chillán y Rengo son las ciudades más concentradas o agregadas con 3 y 7 parches, respectivamente, y con aumento un significativo en su tamaño medio.

Tabla 2

Métricas del paisaje urbano en ciudades chilenas 1993-2011. Fuente: Elaboración propia (2017)

Table 2

Urban landscape metrics in Chilean cities 1993-2011. Source: Own elaboration (2017)

Métrica	Fragmentación						Elongación						Proximidad					
	Número de parches			Fragmentos promedio			Compacidad promedio			Forma promedio			Proximidad promedio			Distancia promedio		
	NP	AREA_MN		GYRATE_MN		SHAPE_MN		PROX_MN		ENN_MN								
Ciudades	2011	2003	1993	2011	2003	1993	2011	2003	1993	2011	2003	1993	2011	2003	1993	2011	2003	1993
Arica	19	9	6	152,9	197,6	261,3	306,7	268,9	377,7	1,43	1,27	1,38	128,9	88,1	83,8	387,5	314,0	534,5
Iquique	7	6	19	431,7	399,0	76,7	769,9	695,1	185,5	1,85	1,81	1,26	91,3	88,5	31,3	535,8	430,5	374,2
Antofagasta	11	9	16	301,2	307,7	144,1	546,6	601,9	314,6	1,54	1,76	1,36	254,1	246,6	141,5	430,2	218,2	222,1
Calama	16	2	5	130,9	646,5	203,2	245,8	807,0	331,5	1,45	1,88	1,34	177,1	161,6	166,9	246,8	200,0	221,3
Tocopilla	3	3	4	135,3	93,3	61,3	532,9	423,9	294,5	1,79	1,59	1,42	25,8	46,4	5,3	456,4	200,0	277,5
Copiapó	20	13	12	120,9	101,9	84,2	295,5	237,9	191,2	1,57	1,45	1,28	72,0	86,9	90,7	260,9	342,4	321,2
Vallenar	1	3	4	629,0	152,7	99,8	1151,5	548,4	403,8	2,69	2,00	1,91	0,0	46,9	30,9	N/A	233,3	235,0
La Serena	44	50	53	136,6	77,8	44,9	333,9	245,3	154,8	1,53	1,42	1,25	147,0	60,5	18,0	283,5	272,3	355,9
Ovalle	9	5	10	117,3	140,2	50,1	337,2	272,7	156,2	1,75	1,28	1,19	6,6	118,2	64,0	512,9	214,2	222,4
Illapel	10	6	5	38,9	44,1	41,6	191,5	203,4	174,2	1,31	1,46	1,25	1,1	11,9	8,0	398,9	310,1	547,6
La Ligua	2	4	6	169,0	64,0	30,7	524,6	246,1	155,6	1,90	1,52	1,29	42,3	29,1	16,4	200,0	205,9	245,1
Quillota	2	1	4	520,5	756,0	139,3	881,3	1182,2	304,4	2,06	2,42	1,47	130,1	0,0	36,0	200,0	N/A	265,9
San Felipe	18	8	10	54,3	87,9	55,0	193,1	194,5	162,1	1,51	1,23	1,24	56,0	26,4	31,2	260,6	343,6	430,0
Los Andes	3	4	4	306,7	200,3	143,8	569,0	399,8	358,5	1,77	1,57	1,53	100,4	61,2	39,6	238,7	200,0	290,5
Valparaíso	42	23	33	349,3	532,9	293,1	413,9	508,6	371,3	1,62	1,58	1,51	756,0	1407,1	449,5	344,0	239,1	286,8
Santiago	205	91	105	353,0	675,3	477,6	218,1	245,2	224,9	1,41	1,29	1,32	4407,5	4156,7	2644,2	282,2	305,1	381,2
San Antonio	5	5	11	296,8	247,0	86,2	551,1	389,3	203,0	2,10	1,42	1,30	39,4	80,9	134,7	262,6	204,7	363,2
Rancagua	33	39	40	117,0	74,3	52,8	251,0	172,3	143,3	1,58	1,35	1,27	116,7	89,7	81,0	253,7	258,1	311,7
Rengo	7	16	17	115,3	24,8	14,5	279,1	120,5	95,2	1,65	1,23	1,17	38,4	27,8	10,0	240,0	231,3	276,5
San Fdo.	21	4	6	71,5	158,8	76,8	313,0	335,6	201,2	1,82	1,72	1,30	55,3	78,5	38,7	348,9	246,8	266,4
Curicó	29	6	9	86,7	233,7	82,9	258,6	306,9	211,9	1,61	1,30	1,32	133,0	212,7	85,6	242,3	263,8	237,1
Talca	47	24	26	76,3	109,8	69,6	185,9	168,2	124,0	1,48	1,24	1,13	218,1	133,6	135,9	257,3	318,4	378,7
Constitución	3	6	5	161,7	56,5	51,6	413,9	195,0	188,1	1,43	1,29	1,32	71,3	22,8	20,6	207,9	241,2	307,4
Linares	4	8	7	335,8	116,3	101,3	561,2	207,8	219,6	2,02	1,30	1,43	227,2	132,5	39,0	205,9	211,8	339,4
Cauquenes	5	4	5	126,4	123,8	78,0	441,5	425,6	309,3	1,70	1,87	1,49	21,8	14,6	4,4	542,0	429,5	438,2
San Carlos	6	6	9	97,3	71,8	42,2	274,0	192,0	162,3	1,71	1,39	1,31	87,7	45,3	46,8	231,5	247,4	272,9
Chillán	3	8	14	979,0	289,6	123,3	841,8	323,2	190,9	2,04	1,59	1,28	439,4	368,7	184,5	207,9	232,4	278,8
Concepción	45	66	98	227,5	126,1	67,2	374,0	253,9	189,2	1,65	1,49	1,35	313,8	275,8	119,7	253,4	252,6	262,9
Los Ángeles	6	17	12	439,7	93,1	84,1	763,1	163,7	200,0	2,37	1,20	1,44	194,2	99,4	80,9	288,5	309,2	264,3
Lebu	5	4	4	57,6	54,3	41,0	263,9	289,4	219,2	1,36	1,62	1,46	21,7	23,5	12,3	251,9	246,0	211,8
Angol	7	9	7	130,1	74,0	61,3	290,2	271,2	263,1	1,62	1,57	1,41	76,4	69,7	10,1	326,6	228,8	323,1
Temuco	25	21	17	173,7	145,9	130,9	341,5	240,7	216,2	1,61	1,32	1,25	110,7	219,6	190,0	306,3	289,4	347,5
Villarrica	11	4	6	72,4	102,8	47,0	329,1	288,0	164,8	1,74	1,46	1,16	7,2	49,3	40,9	397,3	454,1	221,7
Valdivia	32	22	27	86,9	77,9	52,9	301,6	223,2	198,9	1,77	1,50	1,44	89,9	77,0	74,9	372,9	223,5	240,3

Métrica	Fragmentación						Elongación						Proximidad					
	Número de parches			Fragmentos promedio			Compacidad promedio			Forma promedio			Proximidad promedio			Distancia promedio		
	NP			AREA_MN			GYRATE_MN			SHAPE_MN			PROX_MN			ENN_MN		
La Unión	7	9	9	85,4	45,9	31,2	277,4	173,4	159,8	1,53	1,35	1,36	60,4	39,5	18,0	302,2	282,1	320,7
Osomo	7	9	16	315,7	201,0	86,1	517,4	429,5	248,4	1,89	1,68	1,50	289,5	191,0	99,3	224,4	205,2	262,6
Puerto Montt	129	29	36	39,6	72,8	45,0	189,2	187,5	142,5	1,51	1,32	1,23	33,4	78,4	55,3	327,6	263,0	278,9
Castro	16	11	8	37,3	27,7	26,0	213,1	168,0	175,8	1,60	1,35	1,36	34,2	18,7	23,9	236,6	208,6	280,5
Ancud	4	7	8	191,0	64,7	45,3	616,9	188,2	170,3	1,96	1,24	1,30	82,5	48,1	37,2	300,0	203,4	266,1
Puerto Aysén	9	5	3	43,3	56,4	72,3	211,2	270,7	375,7	1,42	1,44	1,67	25,0	13,2	5,5	244,5	253,1	440,4
Coyhaique	4	4	3	172,3	156,3	189,0	366,8	319,2	411,7	1,51	1,31	1,60	48,2	60,7	68,3	304,1	290,1	227,6
Puerto Natales	2	4	4	212,0	90,5	76,3	440,1	236,0	213,0	1,48	1,23	1,17	42,4	50,2	53,0	223,6	250,0	205,9
Punta Arenas	50	36	33	67,1	52,1	44,0	231,0	129,3	120,1	1,58	1,26	1,19	130,22	64,22	73,88	338,1	232,8	335,6

Nota: N/A: sin información.

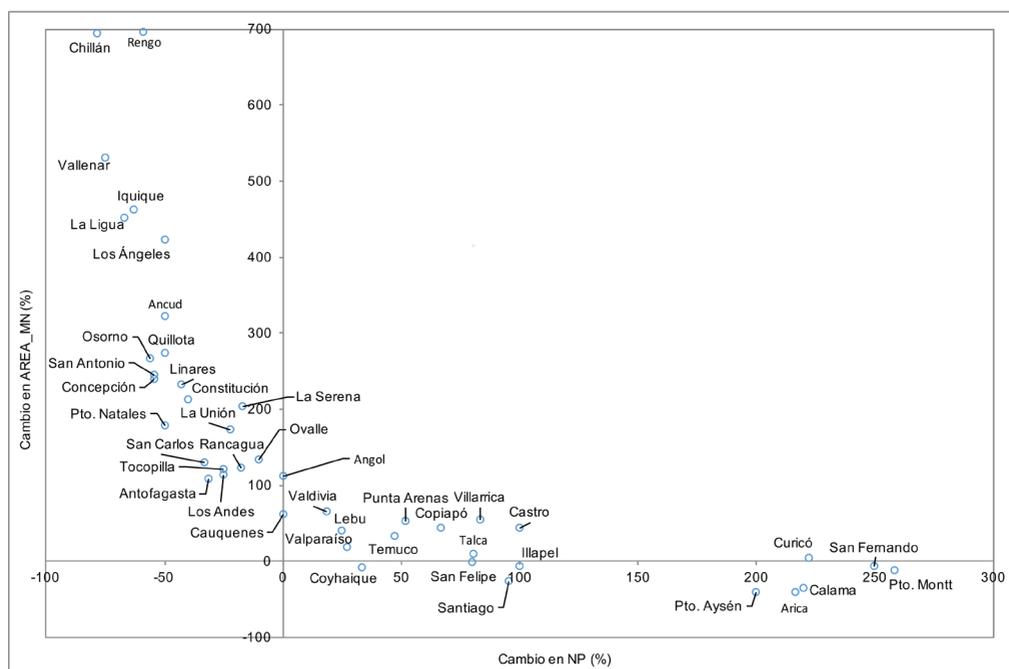


Figura 2. Variación porcentual de la fragmentación entre 1993 y 2011. Fuente: Elaboración propia (2017)

Figure 2. Fragmentation change (%) between 1993 and 2011. Source: Own elaboration (2017)

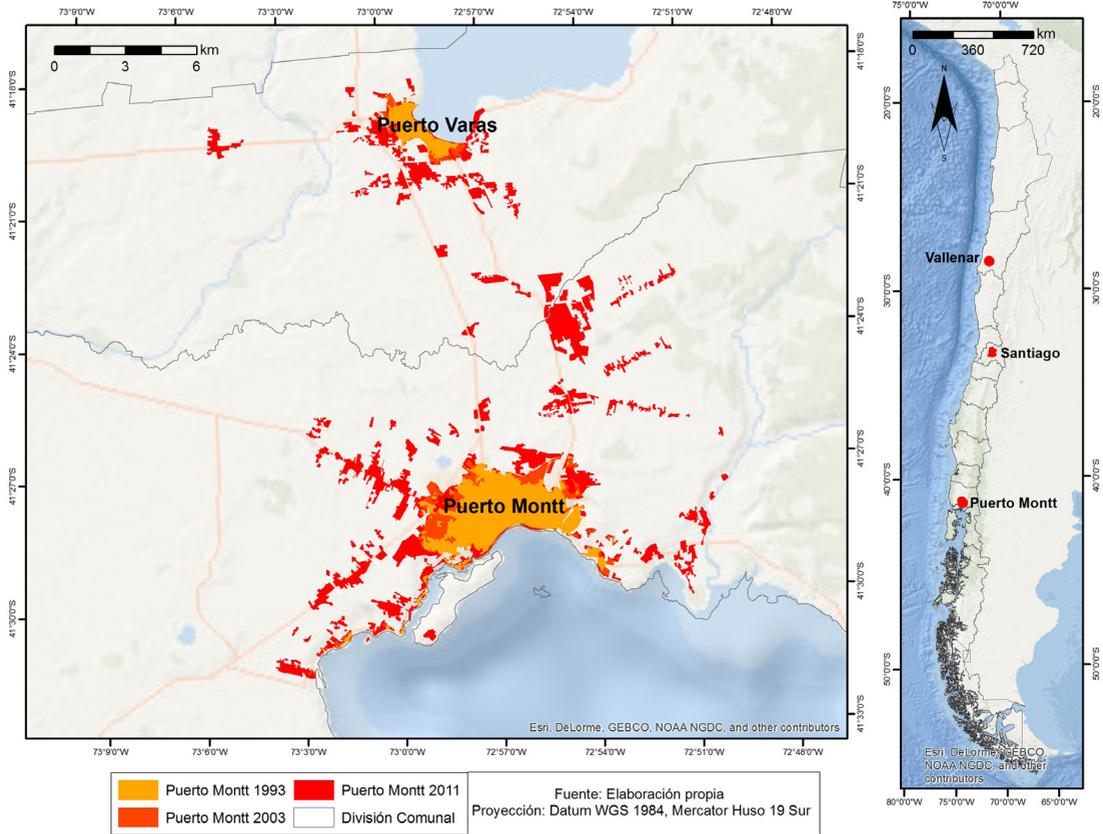


Figura 3. Mapa del conglomerado urbano Puerto Montt-Puerto Varas. Fuente: Elaboración propia (2017)

Figure 3. Puerto Montt-Puerto Varas urban conglomerate map. Source: Own elaboration (2017)

Por su parte la relación entre las métricas GYRATE_MN y SHAPE_MN, representa la presencia de patrones lineales y de forma compleja, respectivamente (figura 4). Un incremento de ambos índices sugiere fragmentos urbanos más elongados, propios de un patrón de urbanización lineal o tentacular en torno a las vías de acceso principal a la ciudad. En términos brutos la ciudad de Vallenar presenta los mayores valores en ambas dimensiones -1.151,5 y

2,69, respectivamente. Esto se relaciona con la disposición geográfica W-E de la ciudad entorno al valle del Huasco (figura 5). Sin embargo, las ciudades que presentan un mayor crecimiento porcentual son Chillán e Iquique (sobre un 300% de variación respecto al año 1993). En general se observan muy pocas ciudades de forma compacta o concéntrica; en el tiempo solo destacan las ciudades de Puerto Aysén y Coyhaique en el extremo sur del país.

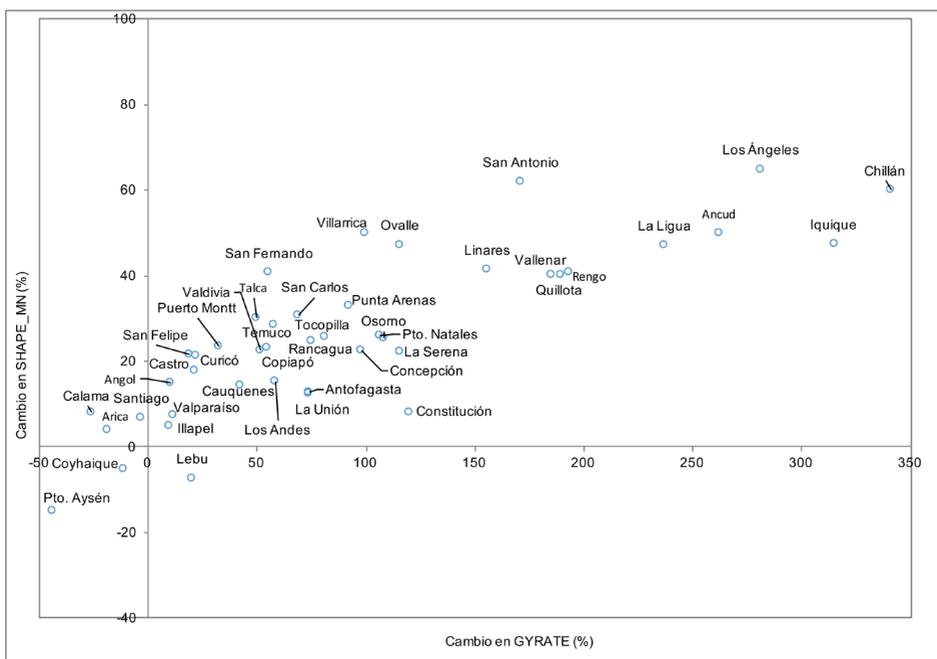


Figura 4. Variación porcentual de la elongación entre 1993 y 2011. Fuente: Elaboración propia (2017)

Figure 4. Elongation change (%) between 1993 and 2011. Source: Own elaboration (2017)

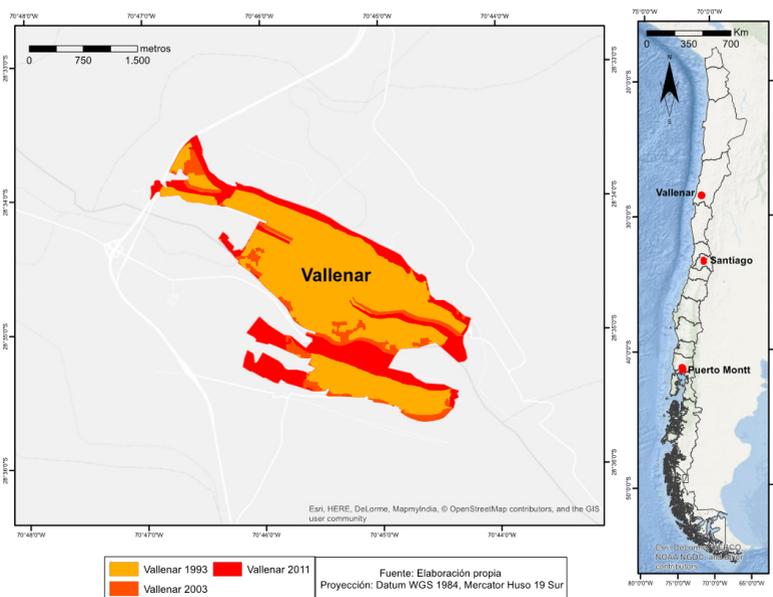
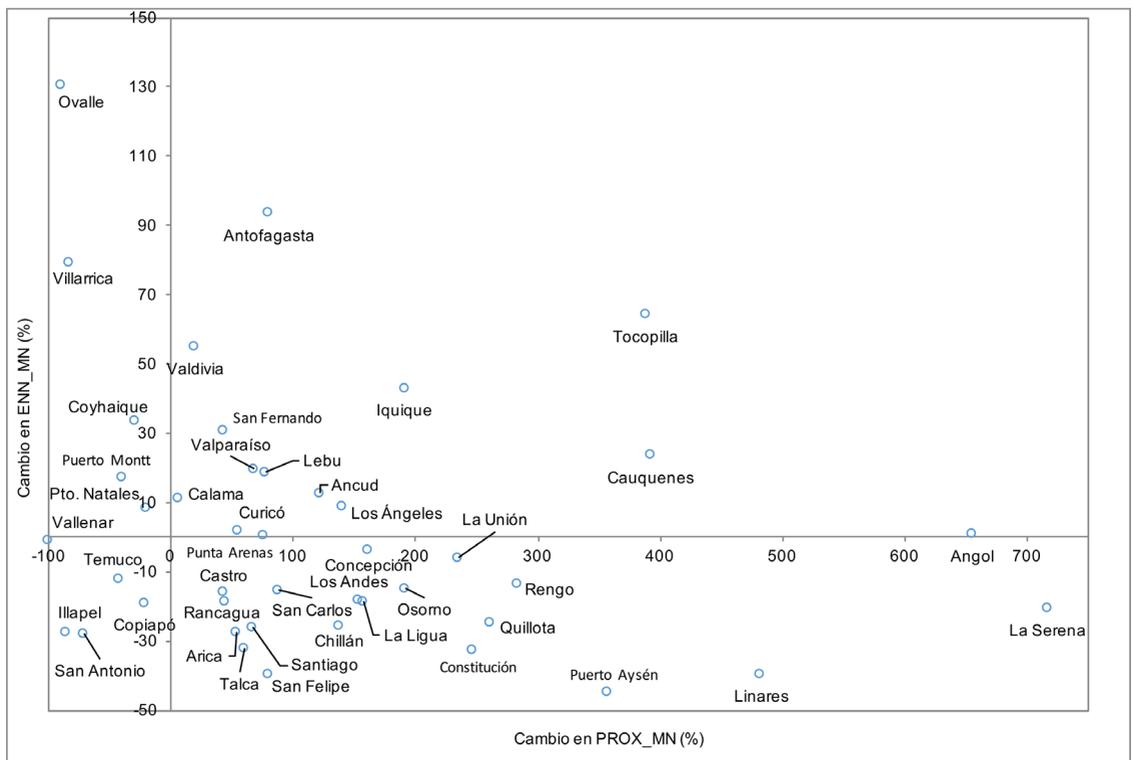


Figura 5. Mapa del crecimiento urbano de la ciudad de Vallenar. Fuente: Elaboración propia (2017)

Figure 5. Urban growth map of the city of Vallenar. Source: Own elaboration (2017)

Por último, los índices de PROX_MN y ENN_MN dan cuenta del nivel de proximidad de los parches urbanos (figura 6). Un incremento de estas métricas mostraría un mayor aislamiento de los fragmentos urbanos, mientras que una disminución, unida al descenso del NP y aumento del AREA_MN, mostraría un patrón más agregado (Aguilera, 2010). A diferencia de los casos anteriores la correlación entre las variables ENN_MN y PROX_MN es bastante baja ($R^2=0,05$). Las ciudades del

norte de Vallenar e Illapel muestran en el tiempo un proceso de mayor proximidad, con una variación porcentual negativa en ambas métricas. Las ciudades más aisladas en términos de PROX_MN bruta son Santiago y Valparaíso, sin embargo, en valores de ENN_MN corresponde a las ciudades Cauquenes e Iquique. En términos de variación porcentual las ciudades de La Serena-Coquimbo y San Felipe muestran mayores disminuciones en PROX_MN y ENN_MN, respectivamente.



Escalamiento urbano

Como se mencionó anteriormente el escalamiento es un conjunto de propiedades asociadas a los sistemas complejos, los cuales exhiben relaciones no lineales, formalizada como power laws. Entre los atributos de sus subsistemas se incluyen variables como tasas de innovación, creación de riqueza, patrones de consumo, comportamiento humano e infraestructura urbana, incluyendo su organización espacial y desarrollo temporal. Una de las variables importantes a escalar, y que representa de buena forma el proceso de metabolismo urbano, corresponde a las emisiones de CO₂ que generan las distintas actividades de la ciudad, que a su vez se asocian con la intensidad de los procesos productivos que ocurren en la ciudad e inciden directamente sobre la calidad del aire.

En el caso del escalamiento de la población urbana del país se observa una tendencia

sublineal de 0,8048, según la relación población y emisiones de CO₂ ($R^2=0,935$). Esto denota una curva de retorno disminuida indicativa de la generación de economía de escala para la producción de CO₂. En otras palabras, significa que para el caso de las ciudades chilenas, existe una menor producción de emisiones per cápita a medida que aumenta el tamaño de la ciudad. Es decir, si comparamos dos ciudades, una con el doble del tamaño de la primera como podrían ser Valdivia y Temuco, veremos (en promedio) que la más grande (Temuco) mostraría un 20% menos de emisiones que si considerásemos dos Valdivias juntas, por ejemplo. En otras palabras, las grandes ciudades emiten proporcionalmente menos CO₂ per cápita que las pequeñas ciudades. A nivel nacional la ciudad que más emite es la metrópoli de Santiago con más de 4 millones de toneladas de CO₂ al año, mientras que las que menos emiten son las ciudades de Vallenar y Tocopilla con menos de mil toneladas al año.

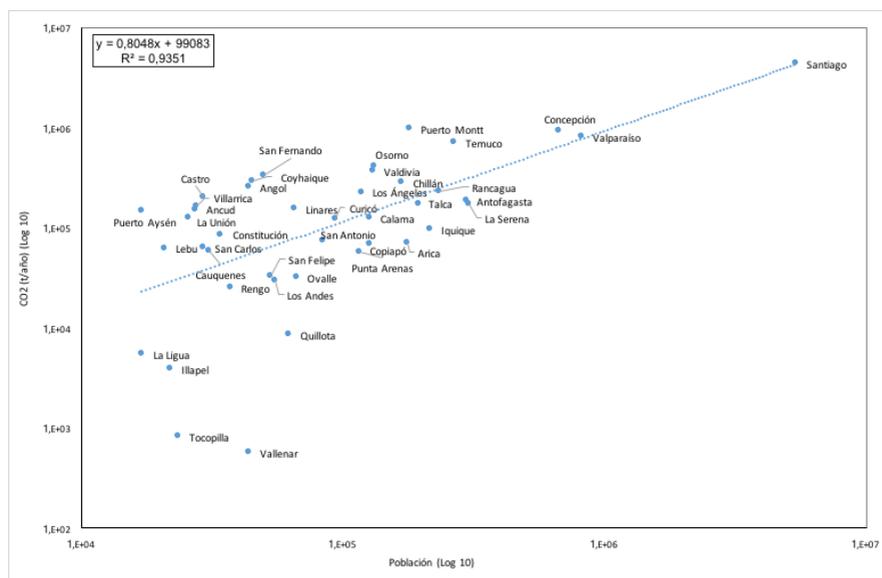


Figura 7. Escalamiento urbano de emisiones de CO₂ en ciudades chilenas. Fuente: Elaboración propia (2017) en base a datos del Censo 2002 (INE, 2005) y datos de RETC 2005 (MMA, 2017)

Figure 7. Urban scaling of CO₂ emissions in Chilean cities. Source: Own elaboration (2017) based on data from the 2002 Census (INE, 2005) and data from the 2005 RETC (MMA, 2017)

Discusión

En relación a la estructura del paisaje urbano, algunos estudios recientes han comenzado a usar métricas de ecología del paisaje en paisajes propiamente urbanos (Aguilera, 2010; Lu, 2015) y en ciudades medias con un fuerte proceso de “peri-fragmentación” (Henríquez, 2009). Dentro de los procesos que explican este acelerado crecimiento en el caso chileno destacan: la laxitud de los instrumentos de planificación territorial en términos de su poca capacidad para controlar el crecimiento horizontal de la ciudad, la rápida dinámica inmobiliaria orientada a un mercado de ingresos altos y medios que prefieren vivir lejos de la ciudad, ligado a lo anterior, la creación y el mejoramiento de vías de transporte vial, especialmente de autopistas privadas de alta velocidad, los mayores ingresos de los hogares junto con la preferencia de estos por viviendas unifamiliares y el uso masivo del automóvil particular. También se suman algunos mecanismos legales como el DFL 3.516 de Subdivisión de Predios Rústicos que permiten la creación de parcelas de agrado, el Artículo 55 de la Ley General de Urbanismo y Construcciones que autoriza la vivienda social en el espacio rural, la ley 2.695 de Bienes Nacionales que permite regularizar los bienes raíces de pequeños propietarios o en el caso particular de la región metropolitana la aplicación de los PDUC (Proyectos Urbanos con Desarrollo Condicionado) por el Plan Regulador Metropolitano de Santiago que permite la urbanización en zonas rurales bajo condiciones especiales. En último término se puede mencionar el crecimiento irregular e ilegal fuera de los límites urbanos vigentes. Todos estos elementos van conformando un paisaje

altamente disperso, caótico y fragmentado con repercusiones directas sobre la sostenibilidad urbana.

Otro aspecto a resaltar es el problema de la escala. De acuerdo al estudio de Henríquez (2014) las ciudades de Chillán y Los Ángeles son mucho más fragmentadas que los resultados expuestos en este estudio. En el periodo de análisis 1978-2013 usando fotolectura a escala 1:30.000, se observa un aumento del número de parches urbanos en ambas ciudades: de 6 parches en 1978 a 225 en 2013 en Chillán y de 20 parches a 167 en Los Ángeles. El crecimiento urbano en estas ciudades medias se caracteriza por ser a distancias cada vez grandes del centro de la ciudad bajo la forma de “salto de rana” y también de manera tentacular en función de las vías principales. De estas cifras se puede desprender un rápido cambio entre un modelo de ciudad compacta tradicional a una ciudad dispersa y difusa (Henríquez, 2014). Mientras que, como se mencionó anteriormente, los resultados obtenidos con los datos del Observatorio Urbano muestran tendencias muy divergentes; esto es, una disminución progresiva del número de parches en ambas ciudades entre 1993-2011, clasificándolas como las ciudades más compactas a nivel nacional. Esta gran diferencia con los resultados de Henríquez (2014) se puede atribuir a las fuentes de información y escala de análisis utilizada, que a diferencia de las coberturas del MINVU permite identificar con gran precisión los procesos de periurbanización como parcelas de agrado y condominios cerrados.

La proyección de estos patrones en los sistemas y conglomerados urbanos que no están constreñidos por su geografía,

plantea cuestionamientos cómo, ¿es posible esperar una intensificación de estos procesos de dispersión y fragmentación urbana en el futuro? En tal sentido, desde un punto de vista prospectivo se ha relacionado las métricas de la mancha urbana de Santiago con la situación futura de la capital al año 2030 y 2050, en base a los resultados de un modelo de simulación futura de cambio de uso de suelo con el programa Dyna CLUE, en el contexto del proyecto Maipo: Plan de Adaptación

(MAPA, 2016). De acuerdo a los valores obtenidos, se aprecia una tendencia a un aumento de la dispersión, de la compacidad y la proximidad urbana (tabla 3 y figura 8). Las cifras absolutas son bastantes superiores al resto de las ciudades del país. Este tipo de métricas como instrumento de comparación espacial, de optimización de simulaciones urbanas y de cambios de usos son de gran importancia para entender la estructura y composición de los paisajes simulados (Aguilera, 2010).

Tabla 3

Simulación de métricas del paisaje en la metrópoli de Santiago 2011-2050. Fuente: Elaboración propia en base a datos del proyecto MAPA (2016)

Table 3

Simulation of landscape metrics in the metropolis of Santiago 2011-2050. Source: Own elaboration based on data from MAPA project (2016)

Métrica	Sigla	Año	Valor	Período	Variación %
Número de parches	NP	2011	205	1993-2011	49
		2030	1291	2011-2030	84
		2050	2037	2011-2050	90
Fragmentos promedio	AREA_MN	2011	352,97	1993-2011	-35
		2030	116,88	2011-2030	-202
		2050	81,31	2011-2050	-334
Compacidad promedio	GYRATE_MN	2011	218,07	1993-2011	-3
		2030	208,28	2011-2030	-5
		2050	170,17	2011-2050	-28
Forma promedio	SHAPE_MN	2011	1,41	1993-2011	6
		2030	1,41	2011-2030	0
		2050	1,34	2011-2050	-5
Proximidad promedio	PROX_MN	2011	4.407,46	1993-2011	40
		2030	1.256,52	2011-2030	-251
		2050	718,84	2011-2050	-513
Distancia promedio	ENN_MN	2011	282,19	1993-2011	-35
		2030	441,59	2011-2030	36
		2050	396,18	2011-2050	29

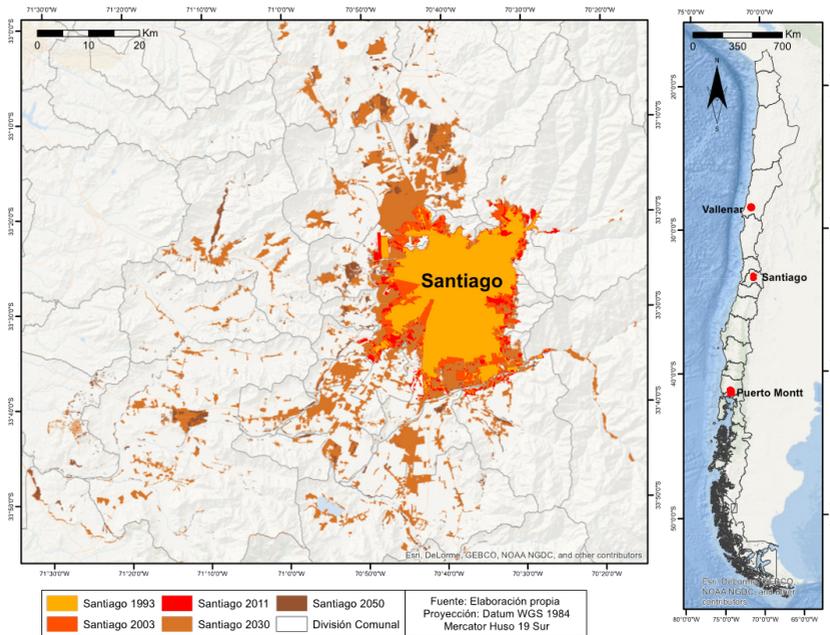


Figura 8. Mapa del conglomerado urbano de Santiago Fuente: Elaboración propia en base a datos MINVU y proyecto MAPA (2016)

Figure 8. Santiago urban conglomerate map. Source: Own elaboration based on data from MINVU and MAPA project (2016)

Por otra parte, respecto al escalamiento urbano se puede indicar que el comportamiento sublineal de las emisiones CO_2 en el sistema de ciudades chileno se asocia a una economía de escala (Cottineau, Hatna, Arcaute y Batty, 2017), tal como sucede en las grandes ciudades de los países desarrollados como Estados Unidos, Alemania, Italia, Singapur, Bélgica, Finlandia, Japón, Francia, Suecia, Reino Unido, Holanda, Canadá, Australia, Suiza o Noruega (Rybski et al., 2016). Esto sugiere que mientras en los países en desarrollo las ciudades pequeñas son más eficientes en la emisión de CO_2 , en los países desarrollados es el caso de las grandes metrópolis (Rybski et al., 2016).

Una de las explicaciones de esta relación sublineal podría deberse a los sistemas de transporte utilizados en las grandes ciudades europeas compactas que tenderían a optimizar los tiempos de desplazamientos y flujos de vehículos a través mejoras como los sistemas de programación de semáforos (Isalgue, Coch y Serra, 2007). Sin embargo, en Chile aún falta avanzar para lograr los mismos estándares de las ciudades europeas ya que el proceso de incorporación de tecnologías limpias o uso de energías renovables aún es parcial. En el caso de las relaciones entre metabolismo urbano y sistemas urbanos, especialmente en las grandes ciudades chilenas como Santiago, es necesario desarrollar mayores estudios.

La tendencia identificada se podría estimar como un rasgo positivo para la sostenibilidad urbana, en términos de volúmenes brutos emitidos (>4,3 millones de toneladas/año en el caso de Santiago), sin embargo es necesario mencionar que las relaciones de escalamiento dependen fuertemente de la definición de los límites de las ciudades (Arcaute et al., 2014; Louf & Barthelemy, 2014). Las unidades funcionales o morfológicas pueden influir en los exponentes resultantes, por lo que no se puede excluir un sesgo si los países en desarrollo utilizan sistemáticamente definiciones diferentes (Rybski et al., 2016). Esta diferencia también se puede aplicar por las distintas definiciones de lo urbano que realizan las instituciones públicas en Chile, por ejemplo, MINVU, INE, Municipios. Por tal motivo estos resultados se pueden interpretar como exploratorios y sujeto a revisión.

En síntesis, se puede establecer que los patrones de crecimiento del sistema ciudades chileno se asemeja al modelo de ciudad difusa o ciudad anglosajona, que se difumina en el ámbito periurbano, ocupando áreas cada vez más extensas, en ocasiones regiones enteras, separada funcionalmente (residencia, industria, residencia, comercio, servicios) y segregada socialmente, uniendo las partes a través de una densa red de carreteras y vías segregadas de transporte privado (Rueda, 1996). El modelo de ciudad anglosajona se caracteriza, además, por una matriz de emisiones centrada en las emisiones del transporte como es el caso de ciudades como Nueva York y Los Ángeles (Baeumler, Ijjasz-Vasquez, y Mehndiratta, 2012). Este a su vez se aleja del modelo de ciudad compacta baja en

carbono que se caracteriza por un bajo consumo de energía y de emisiones por la mayor proximidad de usos. De esta forma los grados de dispersión urbana y el escalamiento urbano de las emisiones se encuentran muy relacionados y requieren de mayores exploraciones sobre sus estrechas interacciones.

Conclusiones

Las métricas del paisaje y el escalamiento son una poderosa herramienta para evaluar los cambios en la sustentabilidad de los paisajes urbanos. Aparte de monitorear los actuales procesos de fragmentación, elongación o aislamiento nos permiten comparar y proyectar procesos y tendencias de crecimiento. Se puede concluir que estos enfoques son muy útiles para la ecología urbana y la planificación urbana en términos de revertir patrones de crecimiento urbano insustentable asociado a un modelo de ciudad difusa dependiente del automóvil particular y potenciar medidas que fomenten la compacidad. La integración de estas métricas de paisaje con el escalamiento y los modelos de simulación de cambio de uso de suelo abre grandes perspectivas de investigación futura.

A modo de desafíos futuros, se puede mencionar que se requiere usar otras fuentes de información, más precisas, para realizar los cálculos de métricas del paisaje y de escalamiento. Es necesario usar fuentes de información como imágenes satelitales o fotografías aéreas de mayor resolución espacial que permitan determinar los parches urbanos a mayor escala. Esto sin duda puede cambiar los resultados acá presentados y mostrar procesos más acentuados de dispersión urbana en ciudades chilenas. En

relación al escalamiento se debe actualizar los datos de tamaño de población urbana, por ejemplo, con datos del censo de 2017 y usar estimaciones de CO₂ a escala urbana (mediante cálculo de huella carbono, procesamiento de imágenes satelitales u otros métodos), ya que los datos oficiales disponibles son a escala comunal y no corresponden al dato exacto de la ciudad. Este tipo de indicador junto con otros del área social y económica nos permitirá aproximarse de manera más completa y sistémica a los niveles de sostenibilidad urbana.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el proyecto Fondecyt N° 1161280. Se agradece al Centro CEDEUS CONICYT/FONDAP 15110020.

Referencias

Aguilera, F. (2010). Aplicación de métricas de ecología del paisaje para el análisis de patrones de ocupación urbana en el Área Metropolitana de Granada. *Anales de Geografía*, 30(2), 9-29. Recuperado de <http://revistas.ucm.es/index.php/AGUC/article/view/31845>

Arcaute, E., Hatna, E., Ferguson, P., Youn, H., Johansson, A., & Michael, B. (2014). Constructing cities, deconstructing scaling laws. *Journal of The Royal Society Interface*, 12(102), 20140745-20140745. <https://doi.org/10.1098/rsif.2014.0745>

Baumler, A., Ijjasz-Vasquez, E., & Mehndiratta, S. (2012). *Sustainable Low-Carbon City Development in China*. Washington, DC: World Bank. ISBN:978-0-8213-8987-4.

Bähr, J., & Mertins, G. (1981). Idealschema der sozialräumlichen Differenzierung lateinamerikanischer Grossstädte. *Geographische Zeitschrift*, 69(1), 1-33.

Batty, M. (2013). *The new science of cities*. Cambridge: MIT Press. ISBN 10: 0262019523

Bettencourt, L.M. (2013). The origins of scaling in cities. *Science*, 340(6139), 1438-1441. <https://doi.org/10.1126/science.1235823>

Bettencourt, L.M.A., Lobo, J., Helbing, D., Kuehnert, C., & West, G. B. (2007). Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(17), 7301-7306. <https://doi.org/10.1073/pnas.0610172104>

Borsdorf, A. (2000). Cómo modelar el desarrollo y la dinámica de la ciudad latinoamericana. *Eure (Santiago)*, 29(86), 37-49. <http://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612003008600002>.

Cottineau, C., Hatna, E., Arcaute, E., & Batty, M. (2017). Diverse cities or the systematic paradox of Urban Scaling Laws. *Computers, Environment and Urban Systems*, 63, 80-94. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2016.04.006>

Dramstad, W., Olson, J., & Forman, R. (1996). *Landscape Ecology Principles in Landscape Architecture and Land-Use Planning*. Seattle, Washington: Island Press. ISBN: 9781559635141

- Forman, R.T.T. & Godron, M. (1986). Landscape Ecology. *Landscape Ecology*, 17(3), 848. <https://doi.org/10.2307/2402669>
- Frohn, R. (1998). *Remote Sensing for Landscape Ecology: new metric indicators for monitoring, modelling, and assessment of ecosystem*. Boca Ratón, Florida: Lewis Publisher. ISBN 1-56670-275-5
- Griffin, E., & Ford, L. (1980). A Model of Latin American City Structure. *Geographical Review*, 70(4), 397-422. <https://doi.org/10.2307/214076>
- Henríquez, C. (2009). El proceso de perifragsmentación del paisaje urbano en la ciudad intermedia de Chillán y Chillán Viejo. In R. Hidalgo, C. De Mattos, F. Arenas (Ed.), *Chile: del país urbano al país metropolitano* (pp. 369-386). Santiago: Serie GEOLibros N°12 y Colección EURE Libros, PUC. Recuperado de http://geografia.uc.cl/images/serie_GEOLibros/del_pais_urbano/Cristian_Henriquez.pdf
- Henríquez, C. (2014). *Modelando el crecimiento de ciudades medias. Hacia un desarrollo urbano sustentable*. Santiago: Ediciones UC. ISBN: 9789561414709
- Hidalgo, R., Borsdorf, A., Zunino, H., & Álvarez, L. (Mayo, 2008). *Tipologías de expansión metropolitana en Santiago de Chile: precariópolis estatal y privatópolis inmobiliaria*. Actas del X Coloquio Internacional de Geocrítica. Barcelona: Universidad de Barcelona. Recuperado de <http://www.ub.es/geocrit/-xcol/434.htm>
- INE. (2005). Chile: *Ciudades Pueblos y Aldeas. 2005*. Santiago de Chile: Instituto Nacional de Estadística.
- Isalgue, A., Coch, H., & Serra, R. (2007). Scaling laws and the modern city. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 382(2), 643-649. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2007.04.019>
- Louf, R. & Barthelemy, M. (2014). Scaling: Lost in the Smog. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 41(5), 767-769. <https://doi.org/10.1068/b4105c>
- Lu, J. (2015). Landscape ecology, urban morphology, and CBDs: An analysis of the Columbus, Ohio Metropolitan Area. *Applied Geography*, 60, 301-307. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.11.004>
- MAPA (2016). *Maipo: Plan de Adaptación*. Proyecto ejecutado por del Centro de Cambio Global UC y financiado por el IDRC Canadá. Recuperado de <http://www.maipoadaptacion.cl/>
- McGarigal, K. & Marks, B. (1995). *FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure* [Software]. Portland, Oregon, USA: Gen. Tech. Report PNW-GTR-351, USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station. Recuperado de <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>
- Ministerio del Medio Ambiente, MMA. (2017). *RETC Registro de emisiones y transferencias contaminantes*. (Informe técnico). Recuperado de <http://www.retc.cl/datos-retc/>

- Pickett, S.T.A., Cadenasso, M.L., Childers, D.L., McDonnell, M.J., & Zhou, W. (2016). Evolution and future of urban ecological science: ecology in, of, and for the city. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2(7), e01229. <https://doi.org/10.1002/ehs2.1229>
- Pumain, D. (2004). Scaling Laws and Urban Systems. Santa Fe Institute, *Working Paper N 04-02 2*, 1-26.
- Rueda, S. (1996). *La ciudad compacta y diversa frente a la conurbación difusa*. (Informe técnico), Universidad Politécnica de Madrid, España. Recuperado de <http://habitat.aq.upm.es/cs/p2/a009.html>
- Rybski, D., Reusser, D. E., Winz, A-L., Fichtner, C., Sterzel, T., & Kropp, J. P. (2016). Cities as nuclei of sustainability? *Environment and Planning B: Planning and Design*, 44 (3), 425-440 <https://doi.org/10.1177/0265813516638340>
- Sukopp, H. (1998). Urban Ecology - Scientific and Practical Aspect. In J. Breuste, H. Feldmann, & O. Uhlmann (Eds.), *Urban Ecology* (pp. 3-16). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-88583-9_1
- Wu, J. (2014). Urban ecology and sustainability: The state-of-the-science and future directions. *Landscape and Urban Planning*, 125, 209-221. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.01.018>