

ARTÍCULOS

Crecimiento urbano y balance de CO₂ en la cuenca del río Elqui (Chile)

Urban growth and CO₂ balance in the Elqui river basin (Chile)

Francisco Bascuñán Walker

Universidad de La Serena, Departamento de Arquitectura, Amunátegui s/n,
Campus Molina Garmendia, tel.: (56) 51 215226, fjbascunan@gmail.com

SUMMARY

The study aimed to establish the relationship between the emission of carbon dioxide (CO₂) caused by the growth of urban population and its rural surroundings fix capacity. We studied the catchment of the river Elqui, Coquimbo region, and determined the total amount of CO₂ generated by its population. Per capita emission of that gas was linked to income and projected population growth of the territory under consideration. In parallel, the binding capacity of these plantations in the watershed was determined; which was compared with total production of carbon dioxide, by defining a maximum threshold of population growth. The study showed that the relationship of sustainability for Elqui basin was 1:61, i.e. the emission of CO₂ in one hectare of urban housing growth would be set by 61's of tree growth. In connection with the case study, the total CO₂ emitted exceeds the binding capacity of the basin at 77 %. It was concluded that to avoid a cumulative increase of CO₂, the binding capacity of the territory analyzed plantation and the producing property (building permits) should be directly linked.

Key words: urban growth, CO₂, sustainability, fixation capacity.

RESUMEN

El trabajo tuvo como objetivo establecer la relación existente entre la emisión de dióxido de carbono (CO₂) provocada por el crecimiento de una población urbana y la capacidad fijadora de su entorno rural. Se estudió la cuenca hidrográfica del río Elqui, región de Coquimbo, y se determinó la cantidad total de CO₂ generado por parte de su población. Se vinculó el ingreso *per cápita* a la emisión de este gas y se proyectó el crecimiento poblacional del territorio en estudio. Paralelamente, se determinó la capacidad fijadora de las plantaciones presentes en la cuenca hidrográfica y se contrastó con la producción total de anhídrido carbónico, definiendo un umbral de crecimiento poblacional máximo. El estudio mostró que la relación de sostenibilidad para la cuenca del Elqui era de 1:61; es decir, la emisión de CO₂ en una hectárea de crecimiento urbano habitacional sería fijada por 61 ha de crecimiento arbóreo. En relación con el caso de estudio, el total de CO₂ emitido excede la capacidad fijadora de la cuenca en 77 %. Se concluyó que para evitar un incremento acumulativo de CO₂, debería vincularse directamente la capacidad fijadora de plantaciones del territorio analizado, con la producción inmobiliaria (permisos de construcción).

Palabras clave: crecimiento urbano, CO₂, sostenibilidad, capacidad fijadora.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional y de las ciudades en el mundo pareciera no detenerse y el espacio que ocupan los asentamientos urbanos está aumentando más rápidamente que la propia población urbana. Se prevé que entre 2000 y 2030, la población urbana del mundo aumentará 72 %, mientras que la superficie de las zonas edificadas donde viven 100.000 o más personas podría aumentar en 175 % (UNFPA 1996). En los últimos 200 años, la población urbana mundial ha pasado de equivaler el 2 % de la población mundial en 1800 a constituir el 50 % de ésta en la actualidad. Los ejemplos que mejor evidencian el ritmo de la urbanización los constituyen las ciudades de 10 o más

millones de habitantes. Mientras que en 1975 sólo había cuatro de estas urbes, en el 2000 aumentaron a 18 y para el 2015 la Organización de las Naciones Unidas estima que habrá 22 localidades de estas características (UNFPA 2007). Según la División de Población de las Naciones Unidas, se prevé que para el año 2030 la cantidad de personas que vivirán en ciudades habrá llegado a casi 5.000 millones, representando el 61,7 % de la población mundial (Boyle 2004) y la población urbana en las naciones en desarrollo se duplicará de 2.000 millones a 4.000 millones en los próximos 30 años (Banco Mundial 2006).

En este escenario de creciente urbanización la producción mundial de bienes y servicios aumenta en forma constante, destinándose principalmente a abastecer el

mercado urbano. Son las ciudades, en consecuencia, los centros responsables del consumo energético y también del impacto medioambiental que esta producción genera. El crecimiento de las ciudades implica contar con recursos para su desarrollo, ya sea suelo, materia o energía (Naredo y Rueda 1998). En términos energéticos el crecimiento y mantención de las urbes demanda principalmente la utilización de recursos derivados de combustibles fósiles, tales como diésel y gas. Si el producto residual de este tipo de combustible, el dióxido de carbono (CO₂), se libera en la atmósfera en cantidades mayores a la capacidad de reintegración que tiene el medio, se transforma en una amenaza para el balance de los parámetros bajo los que se desarrolla la vida (Lashof 1989).

Existe una fuerte relación entre el aumento de la temperatura y la emisión de CO₂ (Hansen 2005) y se calcula que hacia el 2050 la temperatura mundial aumentará en 2° C (Labraga 1998). En este contexto mundial, la capacidad de fijación de CO₂ en áreas vegetales es un recurso deseable por aquellos países de alta emisión (UNFCCC 1998) y más aun cuando la Comisión Europea de Medio Ambiente establece que por cada tonelada de CO₂ emitida sobre el límite fijado por el protocolo, se deberá cancelar una multa cuyo valor es de 100 euros siendo que el valor de un certificado de emisiones reducidas CER en la bolsa de Créditos de Carbono de Cataluña es de 20 euros aproximadamente (Comisión Europea de Medio Ambiente 2008).

Desde una perspectiva global, se observa que las emisiones de CO₂ evidencian una disparidad bastante notoria entre los países más industrializados y las naciones en vías de desarrollo. De esta manera, se ha podido establecer que mientras mayor es la producción que requiere una comunidad, mayor es la cantidad de CO₂ liberado. Las emisiones promedio por persona, según el World Resources Institute (2003), son directamente proporcionales al índice de riqueza o producto interno bruto (PIB) (cuadro 1).

Al respecto, y considerando exclusivamente la emisión de CO₂, Ehrlich y Holdren (1974) proponen que el impacto

medioambiental causado por una población determinada es el resultado de tres factores: el número de personas que integran la comunidad, la medida de los recursos que consume el individuo medio de esa comunidad (índice de riqueza) y el índice de destrucción causado por las tecnologías que le proveen sus productos de consumo:

$$\text{Impacto ambiental} = \text{Población} \times \text{Riqueza/Tecnología} \quad [1]$$

Si la ecuación [1] de Ehrlich y Holdren (1974) se refiere únicamente a la emisión de CO₂ como impacto ambiental y la riqueza es asociada al PIB expresado en dólares corrientes, se podría calcular un valor representativo del nivel tecnológico de un determinado grupo, vale decir, el costo en dólares corrientes que equivale a la producción de una tonelada de dióxido de carbono. En este contexto, mientras mayor sea el valor de la tecnología por tonelada de CO₂, mayor será el nivel de desarrollo tecnológico limpio, pues la emisión de una tonelada de este gas se produce en un umbral mayor de producción (cuadro 1).

Wackernagel y Rees (1996) definieron como huella ecológica el área de territorio ecológicamente productivo que se requiere para generar recursos y, a la vez, asimilar los residuos generados por una población determinada. Cada área ecológicamente productiva tiene una capacidad de fijación de CO₂ diferente y es capaz de compensar la emisión de un determinado grupo. A esta capacidad se le llama “capacidad de carga” y se plantea la idea de que el entorno físico tiene límites de la cantidad de organismos que puede sostener en una zona determinada (Marzluff *et al.* 2008).

El presente estudio busca establecer cuál es el punto de equilibrio entre los centros urbanos de Coquimbo y La Serena y su entorno rural en el valle del río Elqui, definiendo la proporción de superficie adecuada entre ambos medios, de manera que permita a la unidad territorial absorber las emisiones de dióxido de carbono, derivado de la producción de bienes y servicios requeridos para el funcionamiento de las ciudades.

Cuadro 1. Emisiones promedio anuales (2003) *per cápita* de dióxido de carbono (CO₂), producto interno bruto (2003) y nivel de tecnología según la fórmula de Ehrlich y Holdren con datos 2003.

Average annual emissions (2003) *per capita* carbon dioxide (CO₂), Gross Domestic Product (2003) and level of technology under the formula data Ehrlich and Holdren 2003.

Región	Emisión <i>per cápita</i> (Mg CO ₂)	Riqueza: PIB <i>per cápita</i> (US\$) ¹	Tecnología US\$/Mg CO ₂ ²
Estados Unidos	19,8	37.640,7	1.901,05
Australia	18,0	26.502,1	1.472,34
Polonia	7,9	5.668,0	717,47
Sudáfrica	7,8	3.622,2	464,38
España	7,3	21.067,7	2.885,98
México	4,0	6.244,4	1.561,10
Planeta Tierra	3,8	5.426,4	1.428,01
Chile	3,7	4.698,3	1.305,06
Brasil	1,6	3.085,4	1.928,37

¹ La riqueza fue medida en dólares corrientes según información del International Monetary Fund (2003) y la Emisión de CO₂ según datos del World Resources Institute (2003).

² El nivel de tecnología es construcción propia y representa el nivel de tecnología en base productiva.

MÉTODOS

El área de estudio comprendió la cuenca del valle del río Elqui (región de Coquimbo, Chile), incluyendo sus afluentes río Turbio y río Claro, hasta las ciudades de Coquimbo y La Serena, emplazadas en la costa (figura 1).

Para efectos de este estudio, se definieron cinco tipos de vegetación representativos del área donde se desarrolló la investigación, cada uno de éstos con sus respectivas capacidades fijadoras, entendiéndose como tal la cantidad de CO₂ que cada especie vegetal puede incorporar en su organismo a través de su crecimiento, medido en toneladas de este gas. Estos tipos de vegetación son: plantaciones forestales, bosque nativo, frutales, de control dunario atriplex (*Atriplex nummularia* L.) y praderas naturales.

En el caso de las plantaciones forestales, se aplicó el índice de fijación correspondiente a eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill) de 8,18 Mg/ha por año de carbono (Norverto 2006), es decir, 29,97 Mg/ha de CO₂ por año. Para el bosque nativo el indicador de fijación de carbono fue equivalente a 2,91 Mg/ha de CO₂ por año (Fundación Chile 2008). Para los frutales, principalmente vides (*Vitis vinifera* L.), se asoció una capacidad de fijación igual a 10,01 Mg/ha de CO₂ por año, calculada con el sistema *bottom-up* (Mohren y Klein 1990, Burgos 2003), basada en una medición del contenido de carbono que contiene el combustible que se quema. Lo anterior, con base en un supuesto de fijación sobre suelo de un cultivo de 1.640 plantas por hectárea de 50 kg de madera seca y con un porcentaje de 50 % de carbono cada una, en un horizonte de renovación de 15 años.

Para las plantaciones de atriplex se asoció una capacidad de fijación de 0,17 Mg/ha de carbono por año, esto es, 0,75 Mg/ha de CO₂ por año, calculada según un supuesto de fijación sobre suelo de un cultivo de 1.200 plantas por hectárea, de 1,7 kg de madera seca cada una y un porcentaje de 50 % de carbono, en un horizonte de renovación de cinco años.

La capacidad fijadora de las praderas naturales fue de 0,20 Mg/ha de CO₂ por año, calculada según un supuesto



Figura 1. Imagen satelital de la conurbación La Serena-Coquimbo, Chile.

Aerial chart of La Serena - Coquimbo city.

de fijación sobre suelo de una vegetación mixta de cactus (*Eulychnia acida* Phil.) y matorrales, de 120 y 150 plantas por hectárea, respectivamente, de 4 y 2 kg de madera seca cada una y un porcentaje de 50 % de carbono, en un horizonte de renovación de 10 y cinco años cada una.

Para definir la relación sostenible entre el medio urbano y el entorno natural, desde el punto de vista de la fijación y emisión de CO₂, se requirió dimensionar la emanación y fijación total de dióxido de carbono en el sector de estudio y transformar esos valores en superficie de terreno habitacional y vegetal. Se propusieron cuatro niveles de desarrollo (figura 2), por un lado el cálculo de la emisión y por otro el de la fijación de CO₂.

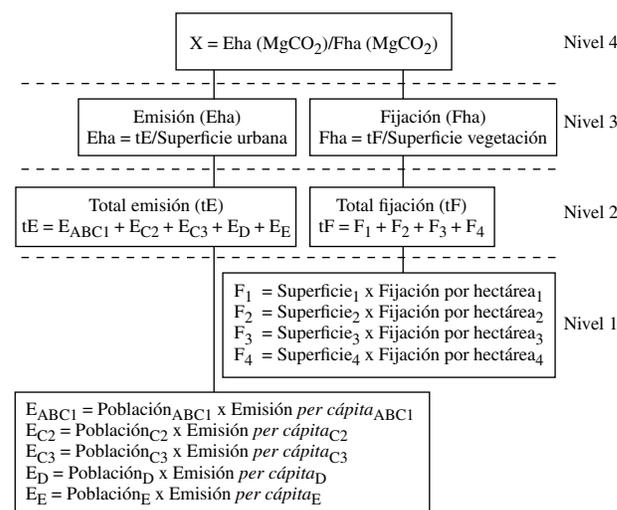


Figura 2. Esquema gráfico de la metodología empleada. X: la relación sostenible entre el medio urbano y el entorno natural desde el punto de vista de la fijación y emisión de CO₂. Emisión por hectárea (Eha): como resultado de la suma proporcional de emisiones de CO₂ de los estratos presentes. Total de emisión (tE): sumatoria de todas las emisiones de cada estrato socioeconómico. E_{abc1}: el total de la emisión del estrato abc1, el cual fue el resultado del producto entre la cantidad de habitantes del estrato (Henríquez 2004, INE 2002) y su emisión *per cápita*. Emisión *per cápita* de cada estrato se ha obtenido dividiendo el ingreso *per cápita* promedio del estrato socioeconómico (Henríquez 2004) por el nivel de tecnología 2. Nivel de tecnología 2: Según la fórmula de Ehrlich y Holdren (1974) fue el resultado de la división entre la sumatoria de ingresos anuales de todos los estratos socioeconómicos (Henríquez 2004, INE 2002) y el total de las emisiones anuales de CO₂ (World Resources Institute 2003).

Schematic chart of methodology. X: the sustainable relationship between urban and natural environment from the point of view of the fixation and CO₂ emissions. Emissions per hectare (EHA) as a result of the proportionate amount of CO₂ emissions of the strata present. Total emission (TE): sum of all emissions from all socioeconomic strata. Eabc1: total emission abc1 stratum which was the result of the product by the number of inhabitants of the layer (Henríquez 2004, INE 2002) and its per capita emission. Emissions per capita of each stratum were obtained by dividing the average per capita income of socioeconomic status (Henríquez 2004) by the level of technology. Technology Level, under the formula of Ehrlich and Holdren (1974), was the result of the division between the sum of annual income from all socioeconomic strata (Henríquez 2004, INE 2002) and the total annual CO₂ emissions (World Resources Institute 2003).

En el nivel 1 se determinó la población por estrato socioeconómico y su correspondiente emisión de CO₂. También la cantidad de especies vegetales presentes en el área de estudio con su respectiva capacidad fijadora. Para determinar la población de cada estrato socioeconómico se asoció el dato de población (INE 2002) a la estratificación socioeconómica porcentual (Henríquez 2004). Para encontrar la emisión de CO₂ por estrato socioeconómico ($E_{ABC1...E_E}$) se multiplicó la población ($Pobl_{ABC1...Pobl_E}$) por la emisión *per cápita*. La emisión *per cápita* se obtuvo al dividir el ingreso promedio *per cápita* de ese segmento, por el nivel tecnológico nacional (cuadro 2, figura 2).

La estratificación socioeconómica consideró cinco grupos que presentan diferencias en su nivel educacional, tenencia de bienes y servicios e ingreso familiar anual (Henríquez 2004). El ingreso familiar anual observado de los estratos fue: ABC1 de US\$ 55.296 o más, C2 entre US\$ 15.667 y US\$ 55.296, C3 de US\$ 9.677 a US\$ 15.667, D entre US\$ 5.069 y US\$ 9.677 y E con US\$ 5.069 o menos. Para la construcción del cuadro 3 se tomaron los valores promedios y se dividieron por 3,65 que corresponde al número de habitantes por hogar (INE 2002). Para determinar la fijación de CO₂ por especie vegetal (F1... F4), se asoció la cantidad de hectáreas presentes en la zona de estudio con su respectiva capacidad fijadora de CO₂.

En el nivel 2 se determinó la emisión (tE) (cuadro 2) y la fijación total (tF) (cuadro 3) presentes en el área de estudio. Una vez determinada la emisión de dióxido de carbono, de acuerdo con la estratificación socioeconómica, se asociaron a los datos poblacionales de la cuenca del río Elqui según INE (2002). Con estos antecedentes, se determinó que la emisión total (tE) de CO₂ de la cuenca del río Elqui, incluyendo los afluentes Claro y Turbio, era de 1.262.292 Mg CO₂ por año (cuadro 2).

En tanto, la capacidad fijadora vegetal total (tF) presente en el valle del río Elqui, calculada al multiplicar la capacidad fijadora de cada especie considerada por su correspondiente superficie, sumaba un total de 292.701 toneladas de CO₂ por año (cuadro 3).

Para el nivel 3, obtenidos los valores totales de emisión y fijación de CO₂ en la cuenca de Elqui, se procedió a determinar el valor promedio de emanación de la superficie residencial (Eha). Esto, considerando el porcentaje de presencia de todos los estratos socioeconómicos y su densidad (cuadro 4), para compararlo con el promedio de fijación por hectárea (Fha) de las coberturas vegetales presentes en la zona de estudio (cuadro 4). Del cuadro 4 se tiene que el valor de emisión por hectárea residencial (Eha) es de 693 Mg CO₂. La fijación total de áreas forestadas, sin incluir forrajeras y praderas naturales, dividida

Cuadro 2. Emisiones promedio anuales *per cápita* de dióxido de carbono por estrato social en el Valle de Elqui, Chile, 2003, calculadas según gasto base de cada estrato.¹

Mean annual per capita emissions of carbon dioxide by social stratum in Elqui valley, Chile, 2003, calculated based expenditure of each stratum.¹

Estrato 2003 cuenca Elqui	Habitantes	%	Gasto anual promedio (US\$)	Emisión anual <i>per cápita</i> Mg CO ₂	tE: emisión por estrato Mg CO ₂
ABC1	23.801	6,7	21.273	16,30	387.995
C2A	18.117	5,1	12.435	9,53	172.639
C2B	45.116	12,7	7.007	5,37	242.231
C3	88.455	24,9	3.472	2,66	235.324
D	126.466	35,6	2.020	1,55	195.751
E	53.286	15,0	694	0,53	28.352
Total	355.241	100,0	-	3,55	1.262.292

¹ Porcentaje y gasto anual por estrato socioeconómico según Henríquez (2004); nivel de tecnología según consumo y emisión anual *per cápita*. Nivel de tecnología: 1.305,00 US\$/ Mg CO₂.

Cuadro 3. Fijación total anual de dióxido de carbono en la cuenca del río Elqui 2003.

Carbon dioxide annual average fixation in Elqui valley by 2003.

Vegetación	Superficie (ha)	Fijación (Mg CO ₂ /ha)	tF: fijación total (Mg CO ₂)
Forestal	1.230	29,97	36.849
Frutales	6.767	10,01	67.737
Viñas	2.074	10,01	20.757
Bosque nativo	938	2,91	2.731
Forrajeras	14.524	0,75	10.893
Praderas naturales	768.671	0,20	153.734
Total	794.203	0,37	292.701

INDAP *et al.* (2001).

Cuadro 4. Emisión de CO₂ total anual en la cuenca del río Elqui en el año 2003. Niveles 3 y 4 de la figura 2.
Annual total CO₂ emissions in Elqui river basin in 2003. Levels 3 and 4 of figure 2.

Estratos	Habitantes	%	Superficie habitacional		Densidad poblacional (habitantes/ha)	Emisión anual estrato social (Mg CO ₂)	Eha: emisión residencial por ha (Mg CO ₂ /ha)
			(ha)	%			
ABC1	23.801	6,7	450,8	24,7	52,8	16,30	860,7
C2A	18.117	5,1	214,5	11,8	84,5	9,53	805,0
C2B	45.116	12,7	320,4	17,6	140,8	5,37	756,0
C3	88.455	24,9	359,0	19,7	246,4	2,66	655,5
D	126.466	35,6	299,4	16,4	422,4	1,55	653,8
E	53.286	15,0	177,6	9,8	300,0	0,53	159,6
Total	355.242	100,0	1.821,7	100,0	195,0	3,55	692,9

por la correspondiente superficie arroja que el promedio de fijación por hectárea (Fha) es de 11,39 Mg CO₂.

En el nivel 4 se determinó la proporción entre ambos valores, los de superficie de emisión (Eha) y superficie de fijación (Fha), para que el balance sea cero; representa las superficies (hectáreas) de áreas urbanas de habitación (cuadro 4) y áreas rurales de vegetación (cuadro 3) necesarias para mantener el equilibrio medioambiental, desde el punto de vista del balance de CO₂ en la cuenca de Elqui.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos a partir del valor promedio de fijación de CO₂ de áreas forestadas (Fha), equivalente a 11,39 Mg/ha de dióxido de carbono por año, frente a los valores promedios de emisión de este gas en la superficie habitacional (Eha), equivalente a 692,93 Mg/ha de CO₂ por año, definieron una relación de área fijadora necesaria para cada área de crecimiento urbano. O sea, la superficie (hectáreas) de bosques o frutales requerida por cada hectárea de urbanización nueva. Esta relación de equivalencia de superficie, en términos de emisión y fijación, fue de 1:60,86. Es decir, se requerían aproximadamente 61 hectáreas de cultivo fijador de CO₂, para fijar el gas liberado en una hectárea de crecimiento habitacional promedio.

Traducido el excedente de CO₂ en su equivalente de emisión por superficie urbana, se pudo establecer que en la cuenca del valle del río Elqui existían 1.399 hectáreas urbanas habitacionales no sustentables desde el punto de vista de la emisión y fijación de CO₂. A saber, el excedente de emisión fue de 969.592 Mg CO₂ por año. Esta cifra, en relación con la emisión promedio por hectárea habitacional (693 Mg CO₂, cuadro 4), dio como resultado el equivalente a 1.399 ha de área urbana.

El CO₂ liberado por el 77 % de la población radicada en la zona no tenía capacidad de absorción dentro del territorio de la cuenca del río Elqui, lo que se transforma en un aporte directo al efecto invernadero y posiblemente constituye un factor más que incide en el fenómeno del calentamiento global del planeta.

Desde el punto de vista medioambiental, el exceso de CO₂ pasó directamente a engrosar el excedente mundial. Para evitar esta situación, el estudio determinó que la cuenca del Elqui requeriría, por lo menos, 32.352 hectáreas forestales al considerar la capacidad de fijación de eucalipto.

DISCUSIÓN

Balance de CO₂ Las emisiones de dióxido de carbono son especialmente sensibles en el estudio de la sustentabilidad, pues mientras la tecnología ha desarrollado mecanismos para reciclar basura, agua y metales, la fijación de CO₂ no ha adquirido la importancia que merece. Los efectos de este gas ya comenzaron a dañar gravemente el planeta, siendo el principal el aumento de temperatura, estimado hasta en 11° C para fin de siglo (Stainforth *et al.* 2005). En este escenario, cada grado de temperatura que aumente en una ciudad equivale a un desplazamiento de 200 km hacia el Ecuador (Torn y Harte 2006).

Las iniciativas existentes dirigidas a llevar a cabo planes de fijación de carbono a través de plantaciones forestales son realizadas generalmente desde una perspectiva económica privada en que particulares de países en vía de desarrollo venden sus Certificados de Emisiones Reducidas (CER) a empresas de países industrializados (UNFCCC 1998). Este comercio de CER se realiza fundamentalmente dirigido a paliar el incremento de emisiones por sobre las metas fijadas en los países suscritos al protocolo de Kyoto (UNFCCC 1998) y no es en ningún caso una medida global.

Dentro del ecosistema natural, las ciudades actúan de manera parasitaria con su entorno, consumiendo los recursos presentes, sin proporcionar o medir su consumo a la generación de éstos. Las consecuencias de construir edificaciones y ocupar el territorio con suelo urbano son de gran calado y, además, irreversibles. Los costos ambientales de esta estrategia son incalculables ya que las repercusiones no se pueden circunscribir sólo a escala local y regional, sino que el impacto tiene que evaluarse, también, a escala global (Rueda 2001). Es así como la capacidad fijadora de CO₂ se ha visto sobrepasada por

mucho a nivel global; y el exceso de este gas es responsable en parte del calentamiento global (Hansen 2005). Desde esta perspectiva, la clave para lograr el crecimiento urbano sustentable podría estar en la capacidad fijadora de su entorno natural directo o asociado.

La fijación de CO₂ se produce en el planeta en diversos lugares que producen materia biológica. En los océanos, grandes cantidades de dióxido de carbono son fijadas en los esqueletos de peces y cetáceos, en los bosques de corales y en los bancos de mariscos de concha. En tierra, sin embargo, los resumideros de CO₂ más importantes son los ecosistemas vegetales, bosques, plantaciones o praderas naturales, los que fijan una importante cantidad del CO₂ en la biomasa y el suelo (Norverto 1997, Gayoso y Guerra 2005) que emiten las ciudades.

Dentro del medio urbano, la materia vegetal existente en parques, avenidas, techos verdes y jardines ayuda en el proceso de fijación. Sin embargo, para que ellos sean verdaderamente incidentes, los diseños urbanos en el área de estudio deberían considerar por lo menos 61 hectáreas de vegetación forestal por cada hectárea habitacional; o bien, la densidad habitacional promedio no debería exceder los 3,20 habitantes/ha. Es decir, aproximadamente una vivienda por cada hectárea forestal o un edificio de 53 departamentos en predios de 60 ha. Esto es en realidad una imagen de ciudad que dista mucho de la urbanidad que se conoce actualmente. Es, en el fondo, una ciudad que se apoya sobre un medio vegetal contundente, imposible de pensar como extensiones urbanas, sino más bien como espacios rurales que interactúan, se preservan y se mantienen simbióticamente asociados a las urbes.

Usar recursos instalados de fijación de un lugar para favorecer a otro podría traer nuevos conflictos éticos de disparidad e inequidad. Así, podría ser cuestionable que los países o sectores más ricos utilicen los recursos naturales de los países o sectores más pobres en su beneficio, limitando la capacidad de desarrollo de estos últimos o incluso favoreciendo la producción de plantaciones forestales, en desmedro de bosques nativos o biodiversos menos productivos. Sin embargo, reconocer y valorar la función depuradora de un determinado lugar puede posicionarlo económicamente dentro de un panorama global, entregándole valiosas herramientas de desarrollo económico.

Tras relacionar las áreas fijadoras de CO₂ presentes en los sectores rurales de la cuenca del Valle de Elqui, con las áreas habitacionales existentes y las viviendas mismas, se calcula y vincula el costo de descontaminación correspondiente a estas zonas, en escalas que van desde la vivienda a condominios, villas o barrios completos. Es decir, cada permiso de construcción de loteo nuevo se puede vincular a una superficie fijadora de plantación rural, para mantener una estabilidad sustentable en el crecimiento y fijar conscientemente los límites posibles de éste.

Si bien es cierto que a nivel de país la emisión anual promedio per cápita al 2003 es de 3,6 Mg de CO₂ (World Resources Institute 2003) y puesto que la emisión es una

responsabilidad fundamentalmente urbana, es posible observar este dato desde una perspectiva más compleja, integrando los diferentes grupos socioeconómicos y vinculando la emisión a sus lugares de residencia. Esta vinculación muestra que los estratos socioeconómicos superiores, o sea, el 12 % de la población más rica, es responsable de la emisión de más del 44 % del dióxido de carbono en estudio. Y la relación de emanación de este gas entre el estrato más rico y el más pobre es de 20:1 (deducido del cuadro 4).

Asociando el nivel de riqueza y emisión con los espacios residenciales urbanos, se observa que la densidad habitacional es inversamente proporcional a la emisión de CO₂. Esto significa que en los estratos socioeconómicos más altos, con densidades de 53 habitantes por hectárea, el nivel de emisión anual bordeó las 861 Mg de CO₂. Sin embargo, en los segmentos medios bajos, con densidades de 422 habitantes por hectárea, la emisión de gas fue de 654 toneladas. Esto se debe a que los sectores habitacionales de menor densidad corresponden a grupos socioeconómicos de ingresos mayores, por ende, generan mayores gastos y emisiones mayores de CO₂.

A nivel de viviendas familiares, se requiere de 1,91 hectáreas de vegetación forestal fijadora de CO₂ en los estratos más altos (ABC1) y 0,18 hectáreas en el estrato más bajo (D). A saber, en una hectárea ABC1 se ubican 15 viviendas con una densidad de 3,52 habitantes por viviendas (INE 2002) que emiten en total 861 Mg de CO₂ (cuadro 4), es decir, 57,4 Mg de CO₂ cada vivienda. Este valor de emisión dividido por el valor de fijación de una hectárea de vegetación forestal (29,97 Mg de CO₂, cuadro 3) entrega 1,91 hectáreas de vegetación forestal por vivienda ABC1. En los estratos más bajos (D) hay 120 viviendas por hectárea con densidad de 3,52 habitantes por viviendas (INE 2002), que emiten en total 654 Mg de CO₂ (cuadro 4), esto es, 5,45 Mg de CO₂ cada vivienda. Esta emisión dividida por el valor de fijación de una hectárea de vegetación forestal entrega 0,18 hectáreas de vegetación forestal por vivienda del estrato D.

Perspectivas y recomendaciones. Con estos antecedentes, la planificación urbana y territorial puede contar con una herramienta concreta para proporcionar y definir los límites entre ruralidad y urbanidad, generando una sustentabilidad responsable, entregando parte del compromiso del crecimiento urbano a los sectores rurales de plantaciones que serán –en definitiva– el soporte ecológico para fijar el anhídrido carbónico emitido.

Cada vez que un proyecto inmobiliario destruye superficie de vegetación, no sólo genera más CO₂ (albergando en sus viviendas a nuevas familias en el sector), sino que también contribuye a tener menor capacidad de fijación. Este sinsentido no está regulado, por lo que cada vez se construyen más zonas urbanas en desmedro de los espacios fijadores, lo que genera un indudable desequilibrio ecológico. Por otro lado, las áreas verdes exigidas en la

Ordenanza General de Urbanismo y Construcción, que rige las urbanizaciones nuevas, equivalen –como máximo– no más del 6 % del terreno a lotear. Esto significa, que de ser forestados estos espacios con vegetación fijadora se obtendría un aporte promedio de 0,1 % de fijación frente al total emitido. A saber, 65 ha fijarían el 100 % del CO₂ de una hectárea de viviendas promedio frente a 0,06 ha por cada hectárea de viviendas propuestas por la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (MINVU 1992). Este porcentaje es demasiado bajo como para ser incidente.

La incapacidad de ciertas zonas geográficas para generar sus propias áreas fijadoras puede permitir la generación de un mercado de acciones fijadoras de carbono (bonos de carbono o acciones de reducción) que, siendo acreditadas y emitidas mediante algún organismo certificador, puedan venderse y vincularse a proyectos inmobiliarios, enviando recursos desde áreas urbanas a la preservación de selvas y bosques tropicales que cumplen con ese objetivo.

Así como cada semestre las municipalidades cobran contribuciones a las viviendas, que incluyen el retiro de la basura doméstica, bajo un nuevo paradigma de conciencia medioambiental, también se podría (o se debería) agregar el costo de extracción de las emisiones de CO₂ que son de responsabilidad de los habitantes de las zonas urbanas.

Si bien el estudio se basó en la capacidad fijadora instalada de un determinado lugar, definido como la cuenca hidrográfica del río Elqui, existe una capacidad fijadora potencial, que debe ser considerada como un dato importante a la hora de perfilar el desarrollo y el crecimiento urbano. Esta capacidad fijadora potencial se puede calcular determinando la superficie de tierra forestable y los recursos hídricos disponibles. Sin embargo, es posible que aun esta capacidad no sea suficiente para responder a la emisión de CO₂ de la zona, obligando –a la luz de la presente investigación– a redefinir los límites zonales, vinculando territorio con capacidad fijadora en excedente. Tal vez en las futuras unidades regionales o comunales, el borde territorial de sustentabilidad sea de territorios asociados, yuxtapuestos o lejanos.

CONCLUSIONES

La planificación territorial debe considerar una relación de superficie fijadora vinculada al territorio urbano y prever su borde de crecimiento máximo, en función de la capacidad fijadora instalada o potencial del territorio. Para definir el límite urbano máximo de una zona urbana en un determinado territorio, se deberá evaluar la emisión urbana de CO₂ según su complejidad social y balancearlo con la capacidad fijadora de su entorno, guardando cuidado de no planificar vegetación fijadora dentro del borde máximo de crecimiento urbano, pues este hecho pondría en riesgo áreas ya consideradas de fijación y disminuiría la capacidad de crecimiento de la ciudad.

El hecho de cerrar un círculo emisión y fijación de CO₂ permite desarrollar económicamente áreas rurales que, hasta ahora, se encuentran fuera del proceso inmobiliario –tales como bosques y frutales–, incorporando al régimen de mercado la acción fijadora. El negocio inmobiliario de producción habitacional tendrá entonces varias aristas, pudiendo ser una buena oportunidad inmobiliaria la producción de áreas fijadoras certificadas, porque éstas serán la llave del crecimiento urbano.

REFERENCIAS

- Banco Mundial. 2006. El mundo en desarrollo se está urbanizando rápidamente y necesita ayuda. Consultado 27 dic. 2008. Disponible en <http://go.worldbank.org/A8C94FYU10>.
- Boyle TB. 2004. Urbanization: An Environmental Force to Be Reckoned With. Population Reference Bureau. Consultado 27 dic. 2008. Disponible en <http://www.prb.org/Articles/2004/UrbanizationAnEnvironmentalForceToBeReckonedWith.aspx>.
- Burgos MJ. 2003. Gestión de riesgos en un mercado de emisiones para el sector eléctrico. Tesis de Master. Madrid, España. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad Pontificia de Comillas. 193 p.
- Comisión Europea de Medio Ambiente. 2008. Acción de la UE contra el cambio climático. El régimen de comercio de derechos de emisión de la UE. Luxemburgo. Oficina de Comunicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas. 23 p.
- Ehrlich P, JP Holdren. 1974. Impact of population growth. *Science* 171: 1212-1217.
- Fundación Chile. 2008. La captura de carbono, un proceso vital para la mantención de la vida. Material preparado por la Fundación Chile para el Ministerio de Educación. Consultado 17 de nov. 2009. Disponible en <http://www.chilepaisforestal.cl/Profesores/pdf/ImpactoecosistemaFicha15Lacaptura.pdf>.
- Gayoso J, J Guerra. 2005. Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. *Bosque* 26(2): 33-38.
- Hansen J. 2005. Earth's Energy Imbalance: Confirmation and Implications. *Science* 308(5727): 1431-1435.
- Henríquez ML. 2004. Censo-análisis socioeconómico Adimark. Adimark GFK, Santiago. Chile. Consultado 10 mar. 2007. Disponible en <http://www.adimark.cl>.
- INDAP (Instituto de Desarrollo Agropecuario, CL), PRODECOP, AGRIMED, Universidad de Chile. 2001. Compendio de información socioeconómica y silvo-agropecuaria de la IV Región de Coquimbo, La Serena, Chile. Alfabet. 135 p.
- INE (Instituto Nacional de Estadística, CL). 2002. Censo 2002. Consultado 22 ago. 2005. Disponible en http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/censos_poblacion_vivienda/censo_pobl_vivi.php.
- International Monetary Fund (IMF) 2003. World Economic and Financial Surveys. Consultado el 24 nov. 2009. Disponible en <http://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2009/02/weodata/index.aspx>.
- Labraga JC. 1998. Escenario de cambio climático para la Argentina. *Revista Ciencia Hoy* 8(44): 18-25.
- Lashof DA. 1989. The dynamic greenhouse processes that may influence future concentrations of atmospheric trace gases and climatic change. *Climatic Change* 14(3): 213-242.
- Marzluff JM, E Shulenberger, W Endlicher, M Alberti, G Bradley, C Ryan, U Simon, C Zumbrunnen (eds.). 2008. *Ecología*

- Urbana: Una Perspectiva Internacional sobre la interacción entre los seres humanos y de la Naturaleza*. Springer, Nueva York. EEUU. Hardcover. 808 p.
- MINVU (Ministerio de la Vivienda y Urbanismo, CL). 1992. Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones. Consultado 19 nov. 2009. Disponible en http://www.minvu.cl/opensite_20070404173759.aspx.
- Mohren GMJ, CGM Klein. 1990. Modelo de fijación de CO₂ CO2FIX. A dynamic model of the CO₂ fixation in forest stands. Report NR. 624. Research Institute for Forestry and Urban Ecology, Wageningen, Holanda. De Dorschkamp. 35 p.
- Naredo JM, S Rueda. 1998. La ciudad sostenible: Resumen y conclusiones. Consultado 10 mar. 2007. Disponible en <http://habitat.aq.upm.es/cs/p2/a010.html>
- Norverto CA. 1997. Los recursos forestales y el cambio climático. Buenos Aires, Argentina. Editorial GRAM. 13 p.
- Norverto CA. 2006. La fijación de CO₂ en plantaciones forestales y en productos de madera en Argentina. Buenos Aires, Argentina. Editorial GRAM. 13 p.
- Rueda S. 2001. Los costes ambientales de los modelos urbanos dispersos. Agencia de ecología urbana de Barcelona. Consultado 2 dic. 2009. Disponible en <http://www.bcnecologia.net/documentos/Costes%20ambientales%20con%20mapas.pdf>
- Stainforth DA, T Aina, C Christensen, M Collins, N Faull, DJ Frame, JA Kettleborough, S Knight, A Martin, JM Murphy, C Piani, D Sexton, LA Smith, RA Spicer, AJ Thorpe, MR Allen. 2005. Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases. *Nature* 433: 403-406.
- Torn MS, J Harte. 2006. Missing feedbacks, asymmetric uncertainties, and the underestimation of future warming, *Geophysical Research Letters* 33, L10703, doi:10.1029/2005GL025540.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change, DK). 1998. Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Consultado 2 dic. 2009. Disponible en <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>
- UNFPA (División de Población de las Naciones Unidas, US). 1996. *El Estado de la Población Mundial 1996: Un paisaje en transformación: La población, el desarrollo y el futuro urbano*. Nueva York, USA. UNFPA. 1 p.
- UNFPA (División de Población de las Naciones Unidas, US). 2007. Estado de la Población Mundial 2007: Liberar el Potencial del Crecimiento Urbano. Consultado 27 dic. 2008. Disponible en <http://reliefweb.int>
- Wackernagel M, W Rees. 1996. *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Gabriola Island, Canada. New Society Publishers. 160 p.
- World Resources Institute. 2003. Emisiones Promedio per cápita. Consultado 6 ago. 2005. Disponible en <http://www.wri.org/>

Recibido: 27.01.09

Aceptado: 21.12.09