

**Crecimiento urbano en la región metropolitana de San José, Costa Rica.  
Una exploración espacial y temporal de los determinantes del cambio de uso del suelo,  
1986–2010**

Rosendo Pujol M. y Eduardo Pérez M.

© 2012 Lincoln Institute of Land Policy

**Documento de Trabajo del  
Lincoln Institute of Land Policy**

Los resultados y conclusiones de este documento de trabajo reflejan la opinión de los autores y no han sido sometidos a una revisión detallada por el personal de Lincoln Institute of Land Policy

Si tiene alguna pregunta o quiere reproducir este documento, póngase en contacto con el Instituto Lincoln. [help@lincolninst.edu](mailto:help@lincolninst.edu)

**Lincoln Institute Product Code: WP13RP1SP**

## Resumen

Se generaron mapas consistentes de área construida en la región metropolitana de San José para los años 1986, 1997 y 2010 utilizando métodos de clasificación supervisada y no supervisada a imágenes satelitales del proyecto Landsat. A partir de ellos, los patrones regionales y municipales de área construida fueron descritos para la estructura y cambio de dichas áreas. La descripción se realizó por medio de índices que describen los niveles de dispersión del área construida (Angel et al., 2005; Burchfield, 2006). Los resultados revelaron que la región es más dispersa y menos densa que otras ciudades latinoamericanas, aunque el crecimiento del área construida ha sido más compacto que el conjunto del área construida del periodo inicial. Los niveles de dispersión del área construida y su crecimiento, por municipio, fueron relacionados, a través de un análisis econométrico, con potenciales determinantes explicativos. Se encontraron asociaciones estadísticamente significativas y consistentes con la teoría, entre distintos índices de dispersión y accesibilidad, existencia de recursos hidrogeológicos y población, así como con los cultivos predominantes.

Palabras Clave: Análisis espacial y análisis histórica de la expansión metropolitana, determinantes de cambios de uso del suelo, expansión urbana, dispersión espacial urbana, San José, Costa Rica.

## Sobre los Autores

**Rosendo Pujol Mesalles** es director del Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible, director de la Maestría en Gestión Ambiental y Ecoturismo y Catedrático de la Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica. Ha dictado cursos de postgrado sobre la economía de la regulación y legislación ambiental. Dr. Pujol es ingeniero civil con MSc en Riesgos Sistémicos y PhD en Planificación Urbana y Regional por la Universidad de California, Berkeley. Recibió el Premio Nacional de Ciencia y Tecnología otorgado por el Gobierno de Costa Rica por su trabajo sobre transportes y telecomunicaciones. Tiene amplia experiencia en planificación urbana, ambiental, y de transporte, y ha dirigido equipos responsables por el desarrollo de regulaciones en varias municipalidades de Costa Rica.

Correo electrónico:: [rosendo.pujol@ucr.ac.cr](mailto:rosendo.pujol@ucr.ac.cr)

**Eduardo Pérez Molina** es investigador del Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible de la Universidad de Costa Rica. Es graduado en ingeniería civil y su tesis fue sobre políticas energéticas para la Región Metropolitana de San José, Costa Rica. Su trabajo como investigador abarca estudios comparativos sobre regulación urbana, accesibilidad de transporte, análisis socioeconómico aplicada a instituciones financieras, y análisis del mercado inmobiliario en las Regiones Pacífico Norte y Central de Costa Rica. Tiene amplia experiencia en la aplicación de SIG en modelos de uso del suelo, en medidas de coberturas del suelo derivadas de sensores remotos y análisis de redes.

Correo electrónico: [eperez@produs.ucr.ac.cr](mailto:eperez@produs.ucr.ac.cr)

## Acknowledgements

Los autores reconocen el trabajo de Roger Mesén, Raily Solano, Leyla Hoppe y Natalia Zúñiga en el procesamiento de información—específicamente en la generación de mapas de uso del suelo urbano. Asimismo, agradecen a los participantes del Seminario de Investigación sobre Políticas de Suelo y Desarrollo Urbano en América Latina (Montevideo, octubre de 2011), especialmente a Diego Erba, Ciro Biderman, Cynthia Goytia, Gregory Ingram, Luis Inostroza, Anna Sant'Anna, Paulo Sandroni y Martim Smolka. Cualquier error es de nuestra exclusiva responsabilidad.

## Índice

|   |    |
|---|----|
| Introducción .....  | 1  |
| Antecedentes .....  | 2  |
| Determinación de cambio de uso del suelo.....   | 4  |
| Uso urbano, área construida y crecimiento urbano.....                                       | 4  |
| Metodología para la determinación del crecimiento urbano.....                               | 7  |
| Preprocesamiento de imágenes .....  | 11 |
| Extensiones del análisis realizado.....   | 14 |
| Patrones espaciales de estructura y crecimiento urbanos en San José.....                    | 15 |
| Medición de área construida, crecimiento urbano y sus niveles de dispersion .....           | 16 |
| Evolución del crecimiento urbano en la región metropolitana de San José, 1986–2010 .....    | 18 |
| Determinantes de la estructura y crecimiento urbano en San José .....                       | 23 |
| Determinantes del proceso de crecimiento urbano y el modelo de ciudades monocéntricas ..... | 23 |
| Estrategia econométrica, limitaciones y extensiones.....                                    | 28 |
| Estimación de modelos que describen el área construida y su estructura.....                 | 28 |
| Estimación de modelos que describen el crecimiento urbano y su estructura .....             | 31 |
| Discusión de resultados seleccionados .....   | 34 |
| De cultivo de café a urbanización: una perspectiva histórica .....                          | 34 |
| Renta agrícola y crecimiento urbano .....   | 35 |
| Infraestructura, regulación y crecimiento urbano .....                                      | 39 |
| Economías de aglomeración y transporte público .....  | 43 |
| Monocentralidad vs. Policentralidad .....   | 44 |
| Conclusiones .....  | 45 |
| Referencias.....  | 48 |
| Apéndice .....  | 51 |

# **Crecimiento urbano en la región metropolitana de San José, Costa Rica. Una exploración espacial y temporal de los determinantes del cambio de uso del suelo, 1986–2010**

## **Introducción**

La región metropolitana de San José es un sistema urbano compuesto por cuatro ciudades (San José, Alajuela, Heredia y Cartago) con diferentes niveles de vinculación funcional y física. Está ubicada en una depresión tectónica, lo cual implica un contexto físico caracterizado por grandes variaciones en el relieve y otras variables (clima, vegetación, fertilidad de suelos). El relieve de la región incluye ríos de cañones profundos y montañas que actúan como barreras a la conectividad entre los distintos centros de población de la región, particularmente de su sistema de transportes. Por estas múltiples restricciones y debido a su origen como un conjunto de poblaciones rurales y ciudades pequeñas, la estructura de la región siempre ha sido relativamente dispersa (véase Pujol, 1988, 2005).

Durante las últimas tres décadas, las dinámicas económicas y sociales nacionales y regionales han incentivado la expansión de la ciudad. La población de la región ha aumentado significativamente (pasó de 1,35 millones de personas en el ejercicio censal 1984 a 2,08 millones en el censo del año 2000; para el año 2011, la población regional había alcanzado los 2,27 millones de personas). Los ingresos de las familias han crecido (el PIB *per capita* nacional aumentó en términos reales un 85 por ciento entre 1985 y 2010). Una motorización creciente y la creación de un sistema de carreteras nacionales/regionales de relativamente alta capacidad han probablemente reducido los costos privados de transporte. Como contrapartida, ante la ausencia y mala definición de regulaciones locales y la debilidad de las regulaciones regionales, este crecimiento urbano ha producido importantes externalidades ambientales negativas. El crecimiento del área construida ha resultado en la ocupación sistemática de los espacios rurales que separaban ciudades y poblaciones en la región, con la consiguiente pérdida en la calidad ambiental del entorno (véase Pérez et al., 2011, para una discusión reciente). La expansión urbana en la periferia, particularmente al norte y noroeste (zonas altas de las ciudades de Alajuela y Heredia), puede poner en grave riesgo los mantos acuíferos que abastecen de agua potable a la mayoría de la región (Reynolds, 1996).

En este contexto, el estudio que se presenta busca construir una primera evaluación general de la evolución del uso de suelo urbano a partir de interpretación de imágenes satelitales. Las manchas urbanas resultantes fueron analizadas en términos de: cantidad y cambio del área construida, el ritmo al cual crece y el nivel de dispersión que presentan tanto la estructura (área construida total) como el crecimiento (nuevas áreas construidas). Los mapas de área construida fueron resumidos por municipio y analizados para identificar los principales determinantes de su crecimiento y sus niveles de dispersión. Esta modelación general, que supone una estructura causal ingenua, propia del análisis probabilístico tradicional (coloca las variables independientes que producen el efecto modelado “al lado derecho” de la ecuación), es un aporte sustantivo que permite entender las dinámicas que resultan en crecimiento urbano, así como en sus niveles de dispersión.

## Antecedentes

Una ciudad es el resultado de complejas interacciones entre grupos humanos y su entorno natural, organizados alrededor de sistemas de transporte y que realizan actividades económicas diversas. Las teorías urbanas, que investigan como se interrelacionan y manifiestan localmente estos factores, son de larga data: existen por lo menos desde la década de 1920 (Bessusi et al., 2010). El modelo más exitoso para describir el comportamiento de una ciudad fue formulado originalmente por William Alonso y posteriormente desarrollado por Mills y Muth para una ciudad monocéntrica; se fundamenta en una intuición fundamental: que la renta del suelo está definida por su localización con respecto al centro. Cuanto más lejana, menor renta del suelo. Este mecanismo es necesario para compensar el hecho de que los costos de transporte al centro (donde se supone se localizan todos los trabajos de la ciudad) son mayores cuanto más lejana la localización. Brueckner (1987) presenta una síntesis del modelo de Alonso-Mills-Muth y deriva muchas de sus características (véase al respecto también el trabajo de Glaeser, 2008). En Glaeser y Kahn (2004) puede encontrarse una derivación de los determinantes del desarrollo disperso y poco denso (*sprawl*) en el marco de extensiones del modelo de Alonso-Mills-Muth. En particular, la reducción de costos de transporte es la variable clave: bajo el marco del modelo monocéntrico, menores costos de transporte implican una expansión de la ciudad en sus bordes y menor densidad; en su extensión a un modelo policéntrico, el cambio de modo de transporte (de transporte público colectivo a transporte privado) reduce en forma importante el costo de nuevos centros de empleo, promoviendo su descentralización.

El análisis de este desarrollo disperso y poco denso ha motivado mucha reflexión reciente sobre la magnitud, determinantes e impactos del *sprawl*. En general, los estudios urbanos en términos de escala, pueden dividirse según la unidad de análisis en: una escala micro cuando tratan de barrios, una escala meso cuando corresponden a una única ciudad y una escala macro cuando comparan muchas ciudades. Dos estudios, en particular, han promovido el desarrollo de investigación de índices de dispersión del desarrollo urbano a escala macro: el trabajo pionero de Burchfield et al. (2006) y la evaluación, en el marco de estudios sobre la urbanización mundial, realizada por Angel et al. (2005) para el Banco Mundial (posteriormente expandida en Angel et al., 2010a, 2010b y 2010c).

Ambos estudios comparten un mismo marco general, que permite una gran flexibilidad en la generación de bases de datos y la modelación del desarrollo urbano: a partir de mapas de cobertura del suelo, se crean coberturas de celdas matriciales que representan el uso urbano. Se estiman estadísticas “focales”: cada celda es caracterizada con respecto a su entorno (Burchfield et al., 2006, definen un índice de dispersión; Angel et al., 2005, definen índices de compacidad y contigüidad). Seguidamente, para cada ciudad, se estima un promedio del valor de este índice representativo de toda la ciudad. Finalmente, se estiman regresiones que exploran la correlación entre el valor promedio del índice y determinantes que caracterizan a la ciudad. Los determinantes representan variables que (a) en el modelo de Alonso-Mills-Muth causan un aumento en el tamaño de la ciudad o una reducción en densidad (e.g. reducción de costos de transporte) o (b) cualifican el supuesto de espacio isotrópico inherente al modelo de la ciudad monocéntrica (e.g. pendiente del terreno).

Este marco metodológico es sumamente flexible porque desarrollar mapas de área construida a partir de la interpretación de coberturas del suelo derivadas de sensores remotos es un proceso relativamente sencillo (véase Bessusi et al., 2010). A partir de el estudio básico de Burchfield et al., se han desarrollado casos en: (a) China, donde Deng et al. (2008) ligaron el tamaño de la mancha urbana principal y su crecimiento con el desarrollo económico, el crecimiento poblacional, la renta del suelo agrícola y los costos de transporte; utilizaron un panel de datos compuesto por municipios de China (cada municipio representando una ciudad) y un periodo de tres años. (b) Comparaciones globales (Schneider y Woodcock, 2008) de distintas medidas de urbanización (área construida y su crecimiento, medidas típicas de la ecología paisajística como densidad de parches, densidad poblacional); Schneider y Woodcock (2008) no llegan a plantear modelos sino que crean una tipología de ciudades según su ritmo de crecimiento. (c) El trabajo de Angel et al. (2005) utiliza, además de sus propios indicadores, el índice de dispersión definido por Burchfield et al. (2006) en un análisis de 90 ciudades del mundo, que evalúa el crecimiento urbano en la década de 1990–2000.

El trabajo de Burchfield et al. (2006) ha sido criticado metodológicamente por Irwin y Bockstael (2008), entre otros, en dos aspectos. Desde el punto de vista técnico de evaluación de uso del suelo, Burchfield et al. (2006) utilizan dos mapas no consistentes entre sí para medir el cambio de uso, lo cual implica limitaciones técnicas. Adicionalmente, los mapas empleados fueron derivados a partir de un sensor de escala media (de celdas de 30 m x 30 m). Irwin y Bockstael (2008) argumentan que, dado que los desarrollos en baja densidad tienen un tamaño de construcción promedio de 200 m<sup>2</sup>, los mapas empleados en Burchfield et al. (2006) sistemáticamente están sesgados hacia una subestimación del desarrollo menos denso<sup>1</sup>.

Una segunda crítica, menos relevante, se refiere a la identificación entre cobertura impermeable y uso urbano. Irwin y Bockstael sugieren que, dado un lote con una edificación y un gran jardín—típico desarrollo exurbano que produce dispersión urbana (*sprawl*) en Estados Unidos, todo el lote debe contar como urbano; es decir, la unidad de análisis debe ser la parcela, y no una discretización arbitraria del espacio. En cambio, Burchfield et al. (y la mayoría de análisis de usos urbanos a partir de sensores remotos de escala media) solo cuentan la cobertura impermeable como uso urbano. Si bien es cierto en la tradición de economía agrícola y ambiental es el costo de oportunidad lo más relevante, desde una perspectiva urbana (como bien argumentan Glaeser y Kahn, 2004), el factor determinante es la *localización* y los *determinantes de dicha localización*. Y dado que las mayores externalidades son generadas por concentraciones humanas, es muy probable que rechazar un método tan prometedor por solo esta razón sea una reacción exagerada.

Se realizó en este estudio un análisis siguiendo el marco metodológico común a Burchfield et al. (2006) y a Angel et al. (2005) pero aplicado a una única ciudad (la región metropolitana de San José) y aumentando el periodo de análisis de dos a tres años. Esto significa que el análisis hecho es de escala meso, por oposición a la escala macro de estos (y otros) autores. Pero dado que los determinantes en todos los casos se derivan del modelo monocéntrico, las relaciones básicas

---

<sup>1</sup> El principal punto de polémica es la categórica aseveración de Burchfield et al. (2006) de que los niveles de *sprawl* en los Estados Unidos no aumentaron significativamente entre 1976 y 1992, en abierta contradicción con muchos estudios que utilizan diversidad de metodologías para concluir lo contrario (e.g. el trabajo de Glaeser y Kahn, 2004, que utiliza densidades de población y empleos).

entre accesibilidad, diferenciales espaciales físicos y patrones de área construida deben conducir a resultados analíticos consistentes en ambas escalas de análisis. Estudios de casos a escala meso, como el que se desarrolló, deberían concebirse como una revisión de los supuestos inherentes a estudios de escala macro, pues si es cierto que un índice de dispersión permite comparar los niveles de *sprawl* entre distintas ciudades, entonces sus patrones espaciales a lo interno de una misma región deben ser consistentes con las proposiciones derivadas del modelo monocéntrico de localización de actividades urbanas; e igualmente para otras medidas de forma y crecimiento urbanos.

En cuanto a la subestimación del área construida, y en particular de desarrollos poco densos, para Costa Rica es difícil juzgar cuán relevante puede ser. Aunque existen levantamientos con fotografías aéreas y satelitales de muy alta resolución, no parecen existir estudios comparativos de usos urbanos según distintas fuentes. Juzgando por la experiencia de análisis anteriores con imágenes satelitales de alta resolución (Pérez et al., 2011), los usos urbanos en la región metropolitana de San José parecen mucho más aglomerados que las densidades citadas por Irwin y Bockstael (2008), probablemente debido a las restricciones que impone un relieve muy irregular. Sumado a ello, los niveles de humedad en la región—en general—permiten un mejor contraste entre celdas incluso parcialmente impermeabilizadas y otras completamente dominadas por la vegetación. Por ello, se espera que los problemas de subestimación de área construida sean menores.

### **Determinación de cambio de uso del suelo**

El uso de imágenes satelitales para la detección de cambios en la cobertura del suelo tiene una larga trayectoria que se remonta a sus mismos inicios, cuando los primeros satélites fueron utilizados por el gobierno de Estados Unidos para investigar el estado de la agricultura de la Unión Soviética (Williamson, 1997). Desde entonces, la tecnología tanto de los sensores remotos mismos como el procesamiento de la información que recogen ha mejorado extraordinariamente. Más recientemente, las coberturas del suelo y sus cambios se han interpretado en términos de usos del suelo (de actividades humanas). Porque los sensores remotos perciben cobertura—y estrictamente, el reflejo de la energía que incide sobre distintos objetos, que se puede interpretar como propio de esos objetos, el conjunto de los cuales constituya la cobertura—su interpretación como usos del suelo no es una operación necesariamente automática. Como bien señalan Seto et al. (2002): por ejemplo, si se acepta que las coberturas del suelo correspondientes a materiales de construcción organizados en infraestructura (concreto, acero, cemento) son equivalentes al conjunto de actividades humanas que allí se realizan, entonces puede interpretarse la cobertura de estos materiales como uso urbano. Nótese que en este caso, la infraestructura de actividades agropecuarias (e.g. un granero) se interpreta como parte del uso urbano (refiérase también a la sección de antecedentes y específicamente a la nota 1).

### **Uso urbano, área construida y crecimiento urbano**

Una ciudad es producto de la aglomeración de agentes urbanos y, por ello, la decisión de si un espacio pertenece a la ciudad depende de su localización con respecto a todos los otros agentes urbanos (residentes, usos comerciales, y otros usos). Desde esta perspectiva, una ciudad es un

fenómeno social con manifestaciones físicas en un contexto espacial particular. El análisis de la localización de actividades dentro de una ciudad—de hecho, el análisis de la ciudad misma en su conjunto—requiere de una definición previa del ámbito que ocupa esa ciudad y en particular de sus límites espaciales (o sea, qué se incluye como parte de la ciudad).

En la versión más simplista de la solución a este dilema, los ejercicios demográficos dividen al territorio en urbano y no urbano clasificando unidades geoestadísticas—e incluso, en algunos casos, municipios enteros (Cohen, 2004). Este enfoque, sin embargo, es de utilidad limitada cuando se busca explorar estructuras espacialmente explícitas, dada la diversidad inherente en el área que cubren algunas de estas unidades.

Las ciencias geográficas proveen una alternativa, los mapas de uso del suelo que describen el territorio de acuerdo con las actividades que sobre él se realizan. El problema analítico en el contexto de estos mapas consiste en describir los patrones de los usos urbanos, lo cual a su vez implica primero decidir cuál área incluir dentro del análisis.

La versión más amplia del límite de la ciudad incluiría todas las localizaciones que se transan en el mercado inmobiliario urbano, independientemente del uso que se les dé. En particular, todos los paisajes rurales que son objeto de especulación inmobiliaria por parte de sus dueños formarían parte de la ciudad y existe fuerte evidencia de que en algunas zonas de la región, particularmente Heredia, los precios del suelo en esta interfaz rural-urbana reflejan expectativa de urbanización antes que el valor presente de rentas agropecuarias (véase Pujol y Pérez, 2012). Bajo este enfoque, toda la región metropolitana—definida por sus límites regulatorios (INVU, 1983)—podría considerarse urbana excepto tal vez el municipio de Alvarado localizado al extremo noreste del Área Metropolitana de Cartago.

Si bien es cierto (casi) cualquier localización dentro de los límites regionales es potencialmente urbana, no todo el espacio está ocupado por personas que realizan actividades urbanas—ni siquiera la mayoría del espacio. Un espacio urbano se diferencia de otras formas de ocupación por parte de seres humanos en la cantidad y densidad de personas que están en esa área; estas, a su vez, permiten la especialización del trabajo, liberando a muchos habitantes de la necesidad de producir alimentos para sí mismos. La diferencia específica de las zonas urbanas, entonces, es el predominio en el espacio de actividades distintas del cultivo o cría de animales: industria, servicios y comercio en cuanto a producción, pero también actividades no productivas tales como (residenciales y recreativas). El desarrollo de estas actividades, a su vez, se caracteriza por la necesidad de infraestructura para realizarlas. Esta característica permite ligar las mediciones físicas del espacio (a través de sensores remotos) con usos (actividades) que se realizan sobre ese espacio; en efecto, las superficies que tienen características físicas de construcciones probablemente están ocupadas por usos urbanos.

La equiparación de áreas construidas con usos urbanos es imperfecta por tres razones, dos de las cuales son poco importantes en el contexto costarricense y de la región metropolitana de San José. Primero, no todas las áreas construidas son ocupadas por actividades urbanas; algunas corresponden a infraestructura propia de la producción agropecuaria o de la ocupación dispersa de espacios naturales—viviendas aisladas, áreas de mantenimiento de parques nacionales, por ejemplo. Este problema es menor porque la abrumadora mayoría de construcciones es de uso

urbano, y esta mayoría es todavía más clara en la región metropolitana de San José. Más aún, incluso en las aglomeraciones de construcciones asociadas a la producción agropecuaria—como son algunos núcleos poblacionales del norte de Cartago, Heredia o Alajuela—existen fuertes vinculaciones cotidianas con la ciudad. Se observa que el padre de familia puede dedicarse a la agricultura y los hijos menores ir a la escuela rural local, pero la madre probablemente trabaje y algunos hijos asistan al colegio en el centro de la ciudad, al cual llegan por un servicio de autobús de relativa alta frecuencia. El cantón de la región con la mayor cantidad de personas empleadas en el sector primario (agropecuario, pesca y minas y canteras), Alvarado, tiene un 47 por ciento de sus habitantes trabajando en actividades no agropecuarias; le sigue el cantón de Poás, donde tan solo el 32 por ciento de la población se dedicaba a actividades del sector primario (cifras del censo de 2000, INEC).

Segundo, es posible que algunas construcciones no sean detectadas por los sensores o, por estar excesivamente aisladas, sean propensas a interpretarse incorrectamente como errores. Pero esta fuente de error es poco importante por definición, pues si el área construida es poca, las actividades urbanas no detectadas también lo son.

El tercer y más significativo vacío viene dado por los espacios en que se realizan actividades urbanas pero cuyas características físicas no coinciden con las áreas construidas sino con áreas no urbanas. Por ejemplo, un parque o un lote baldío es más parecido a un paraje rural de pasto con árboles dispersos que a una edificación del centro de la ciudad<sup>2</sup>. Estas áreas urbanas no han sido incluidas dentro del análisis. En el caso de los baldíos, puede argumentarse que eventualmente van a ser desarrollados (se construirá en ellos), aunque es de interés analizar el patrón de baldíos por sí mismo dentro de la ciudad. Otro uso particularmente problemático son los desarrollos residenciales de muy baja densidad en la periferia, aunque el impacto de estos sobre el conjunto del crecimiento urbano posiblemente sea limitado.

Un último aspecto sobre la localización de usos urbanos que resulta necesario discutir es el tipo de desarrollo urbano. En general, porque las construcciones privadas requieren de acceso a redes públicas y estas son más costosas cuanto más extendidas, es de interés común que la incorporación de suelo al área construida consolidada (o sea, las principales aglomeraciones espaciales de construcciones) se haga en la zona inmediatamente adyacente a esta área construida preexistente. Este tipo de crecimiento se considera orgánico<sup>3</sup>. El crecimiento también puede ser disperso (tipo *sprawl*) si está muy alejado físicamente del área de construcción más densa; en general, que este crecimiento disperso produce mayores impactos ambientales. Algunos de estos se ven interiorizados en mayores costos de vivir en los desarrollos dispersos (por ejemplo mayores costos de transporte), o son compensados por mayor calidad de vida general en la ciudad. Otros costos, notablemente el costo de oportunidad de usar el suelo para usos no urbanos—ambientales o agropecuarios—son fallas de mercado. En particular, la degradación de

---

<sup>2</sup> También ocurre el problema inverso (una cantera es más parecida a un uso urbano que a zonas de cultivo); pero por su localización, este tipo de confusiones son más fáciles de detectar y corregir.

<sup>3</sup> Además de menores costos de infraestructura, el crecimiento orgánico tiende a ser más denso porque estas localizaciones adyacentes a núcleos urbanos son más accesibles (tiene un valor del suelo mayor), lo cual promueve mayores densidades de actividades urbanas – es decir, reduce la cantidad de espacio que se necesario ocupar con construcciones. Esto, a su vez, presenta otros beneficios, en particular, la protección de servicios y sistemas naturales.

recursos hidrogeológicos en el norte de Heredia y Alajuela puede tener muy graves consecuencias para la región en su conjunto a mediano plazo.

En síntesis, el análisis que se presenta incluye la mayoría de actividades urbanas, representadas por el área construida. Tiene limitaciones en cuanto a las áreas baldías, específicamente cuándo deben considerarse estas como uso urbano en lugar de uso agropecuario subutilizado, y a usos urbanos que no utilizan construcciones (en particular, recreación en grandes parques regionales). Aún así, se considera que utilizar el cambio en el área construida como indicador de usos urbanos es representativo de los fenómenos subyacentes, en general, y en particular sobre las consecuencias de menores costos de transporte sobre la estructura y densidad de actividades urbanas. Debe considerarse a lo largo de este trabajo, sin embargo, que se analiza un indicador del grado de ocupación (el área construida) de todo el espacio potencialmente urbano (la región).

### **Metodología para la determinación del crecimiento urbano**

Dada la escala de la información disponible y las dinámicas existentes en la región metropolitana de San José se han interpretado las coberturas del suelo correspondientes a aglomeraciones de edificaciones y carreteras como espacios dedicados a actividades urbanas. Para crear los mapas de área construida, se ha seguido el siguiente procedimiento general:

1. Se seleccionó un grupo de imágenes Landsat correspondientes a los años 1986 (una imagen), 1997 (una imagen) y 2009–2010 (cinco imágenes), (refiérase al cuadro 1). Las imágenes fueron descargadas del sitio en Internet del US Geological Service, que brinda acceso gratuito a su archivo (en Glovis: <http://glovis.usgs.gov> y EarthExplorer: <http://earthexplorer.usgs.gov>).
2. Para todas las imágenes, se estimó el valor de reflectancia en el satélite (o sea, distorsionado por la atmósfera). Las áreas con bruma se consideran como nubes.
3. Todas las imágenes fueron preprocesadas para identificar áreas con cobertura de nubes, las cuales se excluyen del análisis porque no puede identificarse la cobertura del suelo bajo ellas y porque reflejan energía de forma tan intensa que distorsionan los resultados de los algoritmos de clasificación; o sin datos (en el caso de las imágenes de 2009–2011, debido a una falla en el sensor). Estas áreas fueron ignoradas en el proceso de clasificación.
4. Las imágenes de 2009–2010 (3 imágenes, una correspondiente a la estación seca de 2009–2010, otra imagen fue tomada durante la estación seca de 2008–2009 y la última imagen, durante la estación seca 2010–2011) fueron promediadas para suplir con datos de unas y otras el faltante de información asociado a la falla en el sensor.
5. La imagen compuesta de 2010 fue clasificada mediante una muestra supervisada, obtenida por inspección visual de distintas combinaciones de las bandas visibles de la imagen, especialmente las combinaciones de las bandas: 3-2-1 (color verdadero), 4-3-2 (falso color), 7-5-4 (que resalta los bosques). Se aplicó un clasificador de máxima verosimilitud, generando un mapa que incluye las categorías: urbano, pastos verdes,

pastos amarillos, café, cultivos no permanentes y suelo desnudo, agua, cobertura arbórea, cobertura arbórea con sombra de nube y viveros. Se extrajo la cobertura urbana y se revisó el resultado contra las combinaciones de las bandas señaladas para identificar y eliminar celdas mal clasificadas.

6. Se extrajo el uso del suelo urbano para 2010 y se utilizó este mapa como una máscara para la clasificación del uso de suelo 1997. Solamente se clasificaron las celdas de las imagen de 1997 que eran urbanas en 2010. La clasificación se realizó utilizando un clasificador de máxima verosimilitud y algoritmos de clasificación no supervisada, especificados para generar entre 20 y 30 categorías. Las categorías fueron interpretadas según si la cobertura del suelo en 1997 era urbana (área construida en 1997) o si presentaba otros usos, especialmente café (cambio de uso 1997–2010).
7. Se extrajo el uso del suelo urbano de 1997 y se utilizó este mapa como una máscara para la clasificación del suelo del suelo 1986; al igual que en el año anterior, las celdas de la imagen de 1986 fueron clasificadas (utilizando una clasificación no supervisada) y reinterpretadas en cambio de uso 1986–1997 y área construida 1986.

**Cuadro 1. Imágenes seleccionadas para análisis de uso del suelo**

| <b>Fecha</b>            | <b>Path</b> | <b>Row</b> | <b>Sensor</b> |
|-------------------------|-------------|------------|---------------|
| 6 de febrero de 1986    | 15          | 53         | TM            |
| 21 de diciembre de 1997 | 15          | 53         | TM            |
| 1º de marzo de 2009     | 15          | 53         | ETM+          |
| 30 de diciembre de 2009 | 15          | 53         | ETM+          |
| 15 de enero de 2010     | 15          | 53         | ETM+          |
| 5 de abril de 2010      | 15          | 53         | ETM+          |
| 15 de noviembre de 2010 | 15          | 53         | ETM+          |

En programas de software de Sistemas de Información Geográfica (SIG), existen dos formas principales de representación de información: elementos vectoriales y capas matriciales (*tipo ráster*). Estas últimas consisten en matrices de celdas cuadradas donde cada celda representa una posición en el espacio (sus esquinas representan localizaciones físicamente existentes con latitud y longitud conocidas), tamaño (el lado del cuadrado tiene una dimensión en términos de longitud, a la cual se le llama la resolución de la capa matricial) y valor. El valor de la celda puede almacenar una combinación de números que representa su color, un valor sustantivo (por ejemplo, densidad) o un valor discreto que represente categorías (por ejemplo, 1 para área construida, 2 para pastos, etc.)

Para las imágenes de Landsat, cada imagen está compuesta por siete capas matriciales; seis de ellas tienen una resolución de 30 m. La sexta, llamada térmica porque mide los niveles de calor en el suelo, tiene una resolución de 60 m. Cada una de estas bandas almacena un valor de DN (número digital), que es una transformación lineal del valor de reflectancia—la energía reflejada por la cobertura del suelo—a un determinado ancho de banda (véase Lillesand y Kieffer, 1994,

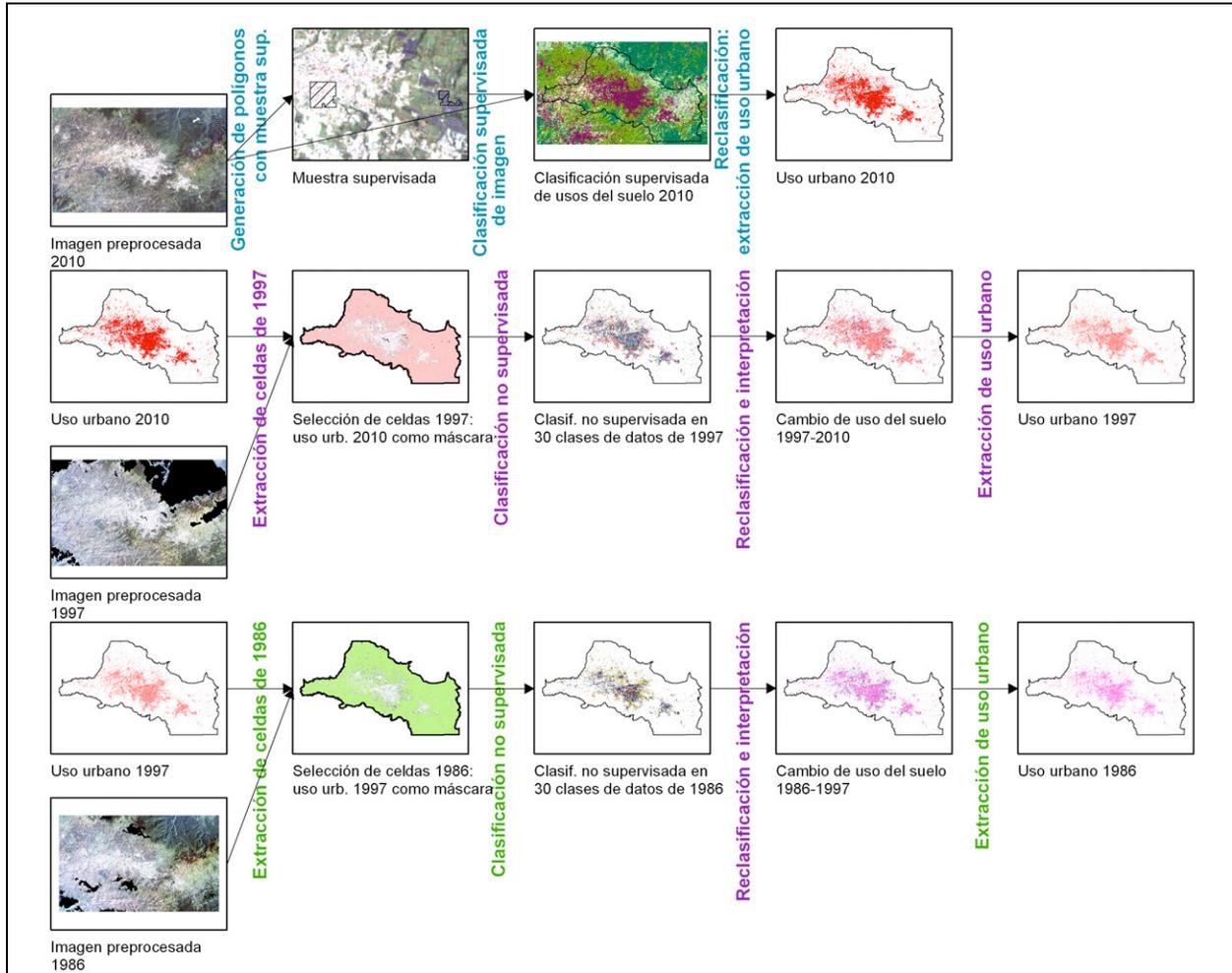
sobre teoría y análisis de sensores remotos). El análisis llevado a cabo en esta investigación utilizó las seis capas<sup>4</sup> de la imagen satelital de Landsat con resolución de 30 m.

Las imágenes de 1986 y 1997 son completamente compatibles entre sí. Como se indica en el cuadro 1, ambas fueron tomadas por el sensor Thematic Mapper (TM) y tienen la misma resolución (tamaño de celda de 30 m). Las imágenes circa 2010 fueron tomadas con el sensor Enhanced Thematic Mapper (ETM+), que es una versión mejorada del sensor TM (Goward et al., 2001, describen con mayor detalle las diferencias). Desde la perspectiva de cambio de la cobertura del suelo, esta diferencia en los sensores implica que la generación de mapas utilizando información de diferentes sensores y su posterior comparación (un enfoque en uso llamado de comparación post-clasificación) puede ser inapropiado, porque aunque los métodos para generar los mapas—o sea, de análisis de las imágenes—hayan sido idénticos, aún así es posible que la diferencia en las áreas construidas no sea cambio de uso del suelo sino diferencias entre la forma en que los sensores perciben la energía emitida por la cobertura del suelo. Esto no significa que sea imposible generar mapas consistentes entre sí utilizando información de distintas fuentes (en particular, de sensores con diferentes) pero sí que la creación de estos mapas debe considerar la consistencia entre mapas diversos para que las comparaciones entre ellos sean válidas.

---

<sup>4</sup> Debe señalarse que algunas combinaciones particulares de bandas – especialmente, la combinación de las bandas verde (2), roja (3) e infrarrojo cercano (4), llamada falso color – han sido históricamente muy útiles para distinguir áreas construidas a partir de sensores remotos. La utilización de las seis bandas tiene que ver con el objetivo original de los mapas que se generaron. Se buscó crear mapas que distinguieran entre distintas coberturas no urbanas (arbórea, pastos, cultivos permanentes – según tipo – y no permanentes, etc.) Las confusiones entre algunos de estos usos tuvieron como consecuencia la decisión de concentrarse, en esta etapa, en las áreas construidas.

**Figura 1. Esquema metodológico de generación de mapas de crecimiento urbano**



En general, y aún bajo las mejores condiciones, las comparaciones post-clasificación tienden a ser ineficientes. Se han desarrollado múltiples enfoques para superar esta dificultad. Uno de los más interesantes consiste en clasificar conjuntamente las bandas de imágenes satelitales correspondientes a varios años (ver Seto et al., 2002).

El enfoque adoptado en este trabajo construye sobre una suposición más simple, también asumida en Burchfield et al. (2006): que no existe “desurbanización”. En otras palabras, las áreas construidas se suponen irreversibles; si un área es ocupada por construcciones en algún momento, se supone que en adelante permanecerá como área construida. Así, al clasificar para un periodo  $t$  solo el área que en el periodo  $t+1$  era urbana (crear una máscara con el área construida de  $t+1$ ), implícitamente se afirma que toda el área construida en el periodo  $t$  está ya incluida en la máscara, pues al no ser posible la “desurbanización”, también está dedicada a construcciones en  $t+1$ . Por lo tanto, el problema analítico se reduce a identificar cuáles celdas de esta máscara eran urbanas y cuáles no, en el periodo  $t$ . El cambio en la cobertura del suelo, que es el crecimiento urbano entre  $t$  y  $t+1$ , viene dado por las celdas de la máscara que no son urbanas en  $t$ . Y el área construida estable es aquel que corresponde a las coberturas interpretadas

como urbanas en ambos periodos ( $t$  y  $t+1$ ). La figura 1 resume el proceso de generación de coberturas de suelo construido a partir de las imágenes preprocesadas.

En principio, este proceso puede repetirse cuantas veces sea deseable y los usos del suelo resultantes son consistentes entre sí por construcción (porque se supone la inexistencia de “desurbanización”). En la práctica, cada vez que se realiza una iteración, siempre existe un pequeño porcentaje de celdas mal clasificadas que pueden resultar en errores considerables conforme se añadan iteraciones (periodos). Por ello, es necesario revisar los resultados de la clasificación contra combinaciones de las bandas para cada periodo.

Sin embargo, pese a esta limitación, el método de clasificación adoptado tiene dos claras ventajas. Primero, la consistencia a través del tiempo, que es lo que se busca garantizar. Pero también, el periodo más reciente, que define la primera máscara (o sea, el conjunto de celdas que incluye el posible universo de celdas construidas a su misma resolución), es el año 2010. Los datos de las imágenes satelitales de 2010 permiten producir resultados más precisos por dos razones: el sensor ETM+ permite distinguir mejor entre coberturas del suelo pues hay menos confusiones entre área construida y otros usos y, al ser el resultado de un promedio de varias imágenes, los posibles errores asociados a condiciones extremas particulares (como que el suelo esté anormalmente seco, confundiendo el área construida y los pastos degradados) se reducen.

### **Preprocesamiento de imágenes**

El preprocesamiento de las imágenes satelitales seleccionadas busca concentrar el análisis cuantitativo (los algoritmos de clasificación supervisada y no supervisada) en las variaciones entre coberturas del suelo de interés. Para ello, (a) considera únicamente un rectángulo definido por las coordenadas extremas (latitud y longitud) de la región, (b) excluye los valores de reflectancia para las nubes y sombra de nubes, que tienden a ser extremos (y por lo tanto a sesgar la clasificación y que además no aportan información útil para la clasificación de la cobertura del suelo bajo ellos<sup>5</sup>) y (c) realiza la clasificación sobre valores de reflectancia, que son una dimensión física, y no sobre la abstracción que es el número digital<sup>6</sup>.

Como se mencionó, los sensores remotos (y en particular, los sensores TM y ETM+) registran los valores de reflectancia—energía reflejada a determinada longitud de onda—correspondientes a distintos puntos en el espacio. Sin embargo, el almacenamiento en archivos digitales de magnitudes con muchos decimales (necesario para representar apropiadamente la dimensión física que es el valor de reflectancia) es poco práctico. Piénsese que almacenar un número del orden de centenas sin decimales requiere de tres dígitos; ese mismo número con cuatro decimales implica almacenar 7 dígitos, lo cual implica un archivo digital dos veces más grande. Como parámetro de comparación, el archivo comprimido descargable de una imagen del sensor ETM+ (satélite Landsat 7) tiene un tamaño de entre 200 y 300 MB utilizando números digitales.

---

<sup>5</sup> Esto es cierto para sensores ópticos como los sensores TM y ETM+; otros sensores (por ejemplo los sensores SAR) miden frecuencias y utilizan métodos de medición que pueden interpretar el suelo independientemente de la existencia de nubes o de la iluminación solar.

<sup>6</sup> Esta última adecuación es cuantitativamente irrelevante porque consiste en una transformación lineal de los datos originales; se realiza por razones conceptuales (la reflectancia es una dimensión física, físicamente interpretable como cobertura del suelo, por oposición al número digital que es una mera abstracción).

El proceso de convertir un número digital en valores de reflectancia es relativamente sencillo: el número digital es simplemente un valor discreto que re-escala valores de radiancia. Los valores de reflectancia recibidos por el sensor, a su vez, son una función de este valor de radiancia y de las características de latitud a la cual se registra la imagen satelital, la forma en que la luz solar se refleja en la Tierra y la posición del satélite con respecto a la Tierra y el Sol. Así, la conversión de número digital a valores de reflectancia se lleva a cabo aplicando las ecuaciones [1] y [2]

$$L_{\lambda} = \frac{(LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}) \cdot (QCAL - QCALMIN)}{QCALMAX - QCALMIN} + LMIN_{\lambda} \quad [1]$$

donde  $L_{\lambda}$  es la radiancia espectral de la celda,  $LMIN_{\lambda}$  y  $LMAX_{\lambda}$  son los valores mínimos y máximos, respectivamente, de radiancia en la banda, QCAL es el valor de número digital, QCALMIN es 1 (el mínimo valor posible de número digital) y QCALMAX, 255 (el máximo valor posible de número digital). A su vez, la relación entre reflectancia y radiancia viene dada por:

$$\rho_p = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{ESUN_{\lambda} \cdot \cos(\vartheta)} \quad [2]$$

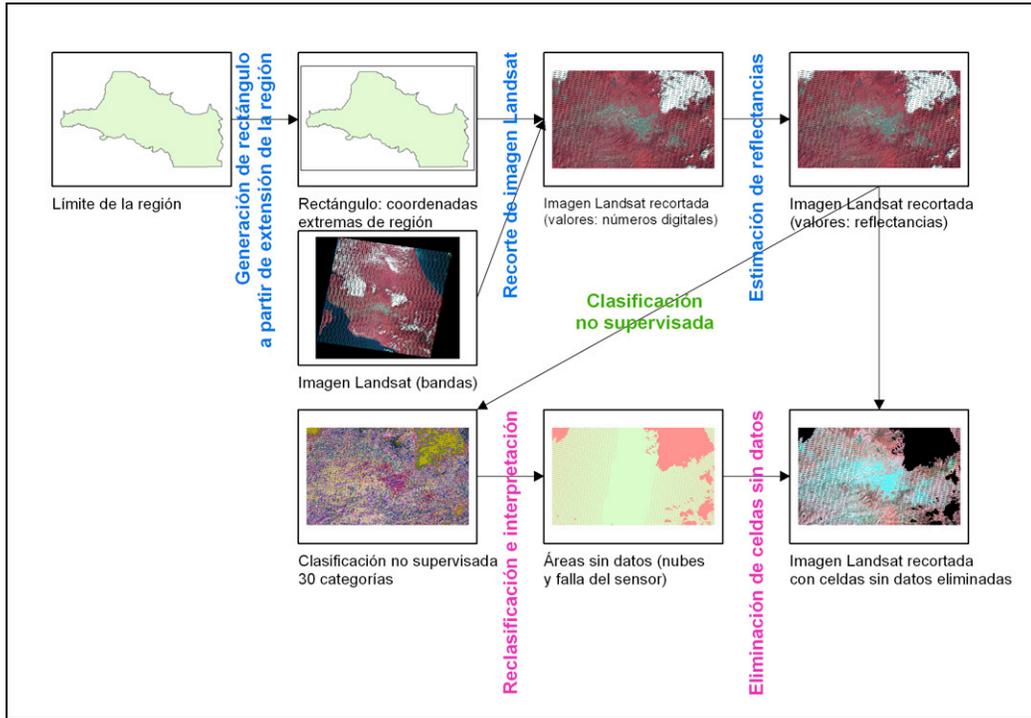
con  $\rho_p$  el valor de reflectancia,  $ESUN_{\lambda}$  la irradiación solar más allá de la atmósfera,  $\cos(\vartheta)$  el coseno del cenit solar y  $d$  la distancia entre la Tierra y el Sol.

Las imágenes clasificadas de 1986 y 1997 fueron seleccionadas para que incluyeran la menor cantidad posible de área cubierta por nubes. En general, todas las imágenes fueron tomadas durante la estación seca de la región (correspondiente aproximadamente de diciembre a abril) precisamente con este objetivo. Aún así, la segunda tarea—después de haber cortado la imagen completa para crear una cobertura de solo el área de interés—consistió en delimitar el área nubes y asignarle un valor de “Sin Datos.” Para ello, se realizaron clasificaciones no supervisadas utilizando las seis bandas de cada imagen. Los resultados se reclasificaron en dos categorías: el área correspondiente a las nubes, a la cual se le asignó el valor de  $-1^7$ , y el área de todas las otras celdas, para las cuales se mantuvo el valor de número digital, que posteriormente fue convertido a reflectancias siguiendo el procedimiento descrito.

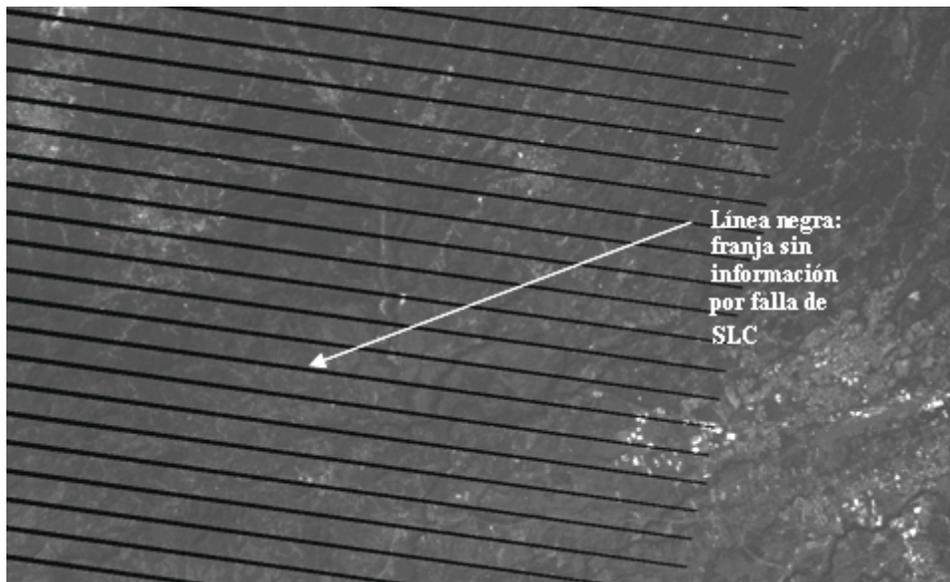
---

<sup>7</sup> Hubiera sido conveniente asignar a estas celdas el valor de 0 pero este valor de reflectancia es teóricamente válido (una cobertura de suelo podría no reflejar energía en una determinada longitud de onda); por ello, se utiliza -1. En la práctica, esto significa que en otros ejercicios de clasificaciones, todas las celdas con valor -1 (sin datos) son agrupadas en una sola categoría.

**Figura 2. Preprocesamiento de imágenes seleccionadas**



**Figura 3. Acercamiento a banda 1 de imagen tomado por el sensor ETM+ el 15 de enero de 2010**



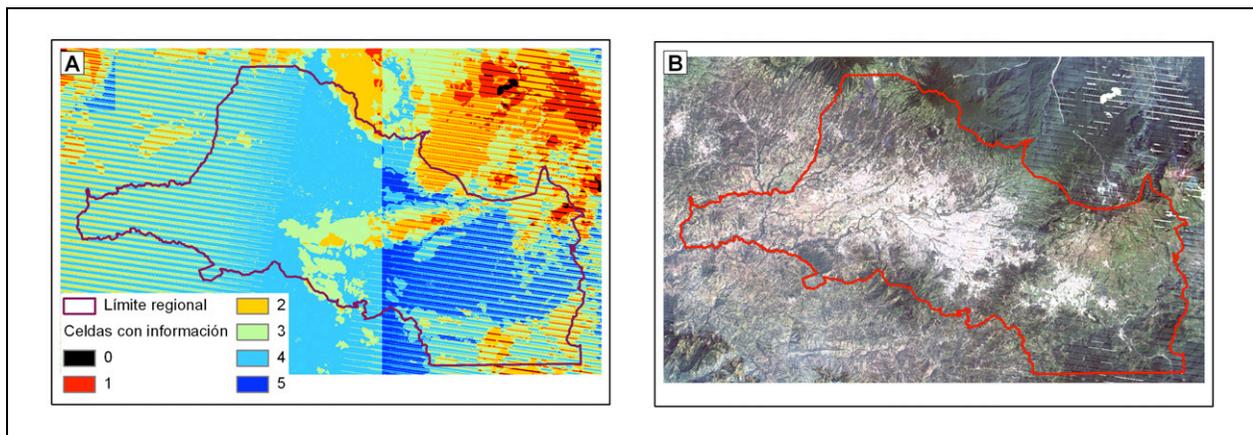
El 31 de mayo de 2003, el *Scan Line Corrector* del sensor ETM+ falló. Este componente tenía la función de compensar por el movimiento hacia delante del satélite. Como consecuencia de esta falla, a partir de entonces las imágenes satelitales de Landsat 7 presentan una falta sistemática de

información: una línea que es más gruesa en los bordes de la imagen pero conforme se mueve hacia el centro, desaparece (véase figura 3).

Con el fin de evaluar el uso del suelo en estas franjas, se ha desarrollado un método para estimar la reflectancia en estas celdas sin información. Cuando el satélite toma la imagen centrada aproximadamente en la región, no lo hace exactamente a la misma latitud. Existe un pequeño desplazamiento. Esto significa que una celda con la misma posición (iguales coordenadas) puede no tener información en una imagen y sí tener información en la imagen tomada en otro momento. Así, se han preprocesado cinco imágenes para el año 2010: tres correspondientes a la estación seca 2009–2010, una de la estación seca 2008–2009 y otra de la estación seca 2010–2011.

Despreciando los cambios de cobertura dado el corto periodo de tiempo, se estima el valor de reflectancia de cada celda como *el promedio de todas las celdas que tengan información*. Así, si en una celda hipotética está cubierta por nubes en la primera imagen, no tiene información por la falla del sensor en la segunda imagen y sí tiene información en la tercera, se asigna el valor de reflectancia en la tercera. En cambio, si otra celda sí tiene información sobre la cobertura del suelo en las tres imágenes, a esa celda se le asigna como valor de reflectancia el promedio de los valores correspondientes a las tres imágenes. De este modo, esencialmente se completó la información de reflectancia del suelo para prácticamente toda la región y se notó que las áreas con información faltante están alejadas del centro de las ciudades de la región. La figura 4 muestra las celdas clasificadas según la cantidad de imágenes que tienen información y la imagen compuesta resultante.

**Figura 4. Celdas según cantidad de imágenes con información [A] e imagen compuesta resultante para el año 2010 en color verdadero (combinación de bandas 3-2-1) [B]**



Fuente: Imágenes tomadas por el sensor ETM+ del satélite Landsat 7, path 15, row 53, de las fechas: 1° de marzo de 2009, 30 de diciembre de 2009, 15 de enero de 2010, 5 de abril de 2010 y 15 de noviembre de 2010

### Extensiones del análisis realizado

El desarrollo de metodologías para la detección del crecimiento urbano consistente en el tiempo permite extender la serie de datos para incluir más periodos. Específicamente, es deseable contar con por lo menos dos evaluaciones adicionales: áreas y crecimiento urbano para algún año

cercano a 2004 y para algún año cercano a 1991. La selección del año se realiza con el objetivo de reducir la pérdida de información por cobertura de nubes y según la disponibilidad de imágenes Landsat en los archivos en línea del USGS. Para imágenes Landsat que se analicen en el futuro, se explorará la posibilidad de emplear el método desarrollado para resolver el problema de pérdida de datos por SLC, y aplicarlo para pérdida de datos por cobertura de nubes.

A mediano plazo, sería valioso explorar formalizaciones adicionales que resuman la información de las imágenes satelitales dando realce a las variaciones entre coberturas (por ejemplo, análisis por componentes principales o la transformación de Kauth-Thomas). El uso sistemático de clasificaciones supervisadas conjuntamente de varios periodos debería ser de gran potencial para realizar estimaciones adicionales, sobre todo incorporando distintas categorías de uso del suelo y no solo el cambio en el área construida, como las estimaciones actuales realizadas.

### **Patrones espaciales de estructura y crecimiento urbanos en San José**

Los mapas de área construida fueron desarrollados siguiendo la metodología expuesta. El mapa “Crecimiento urbano en la Gran Área Metropolitana, Costa Rica 1986–2010” muestra los resultados que se generaron. Previo a la discusión sobre la medición del área construida y sobre todo de sus niveles de dispersión, resulta necesario plantear el impacto de la escala sobre los resultados. Irwin et al. (2006), en su evaluación original sobre el trabajo de Burchfield et al. (2006) y su análisis del sprawl en el Estado de Maryland, Estados Unidos, distinguen tres escalas. En primer término, la resolución de la información base, o sea los mapas de usos del suelo urbano. Los mapas de la región metropolitana de San José se generaron con imágenes satelitales con una resolución de 30 m, misma que se mantuvo para los mapas de uso del suelo. Una segunda escala corresponde a la unidad que se utiliza para definir el indicador. Por ejemplo, si los datos se resumen en cuadrados uniformes de lado  $L$  y  $L$  es muy pequeño, algunos cuadrados tendrán resultados que no son representativos de los datos del uso del suelo sino de los errores del proceso de clasificación. Y si  $L$  es muy grande, entonces la heterogeneidad del fenómeno puede perderse en el valor promedio asignado. Finalmente, está la escala a la que se resume el indicador.

En este análisis son calculados los indicadores de área construida, crecimiento de área construida e índices de dispersión, contigüidad y compacidad, así como la tasa interanual equivalente del crecimiento urbano, los cuales son, en general, estimados para los distintos municipios. La única excepción es el índice de dispersión, que se calcula para cada celda utilizando una ventana de 1 km x 1 km aproximadamente (990 m x 900 m, que está definida por un cuadrado de 33 x 33 celdas); este índice también se resume por municipio.

Originalmente, se había previsto realizar estimaciones a nivel distrital para resumir los diversos indicadores. La región metropolitana de San José tiene 31 municipios divididos en 167 distritos. El área de municipios varía entre 675 ha. (Municipio de Flores) y 26146 ha. (Municipio de Alajuela); los distritos, entre 55 ha. (San Francisco de Goicoechea) y 6319 ha. (Colón, Mora)<sup>8</sup>. Sin embargo, las limitaciones en la generación de los mapas de uso del suelo urbano obligaron a

---

<sup>8</sup> Utilizando la división territorial administrativa de 2005; desde entonces, se han creado tres distritos en la región. Se considera solo el área de los distritos que está dentro de la región.

utilizar unidades espaciales de análisis más grandes; de ahí que los análisis se hayan realizado por municipio. Específicamente, el área construida en los distritos rurales y periféricos de la región es sumamente dispersa y de edificaciones relativamente pequeñas en área. Por ello, no eran percibidas por el satélite o aumentaba el nivel de confusión entre ellas y otros usos con características espectrales similares (tales como suelos desnudos y cultivos no permanentes, o pastos muy degradados). En consecuencia, los valores de índices—incluyendo el más básico, el área construida total—no parecían confiables<sup>9</sup>. Como el área construida de estos distritos es un porcentaje muy pequeño del total, el valor de área total para el municipio presenta niveles de error, en promedio, mucho menores que las áreas totales por distrito.

### **Medición de área construida, crecimiento urbano y sus niveles de dispersion**

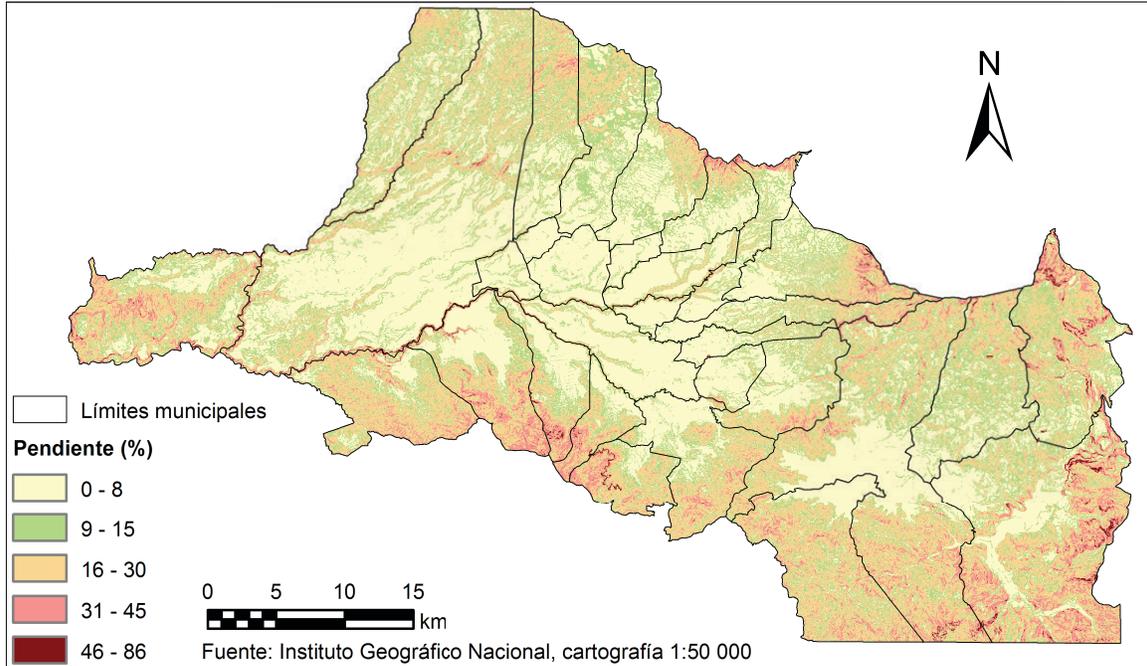
Esta sección resume las medidas que se utilizaron para describir el área y crecimiento urbano de la región metropolitana de San José. Los índices y áreas fueron calculados para la región en su conjunto y para cada municipio. Los índices y áreas municipales permiten una descripción de los patrones de urbanización, al discretizar el espacio en unidades con significado político-administrativo, histórico y cultural—y en cierto sentido físico, pues muchos límites intermunicipales son ríos o divisorias de aguas. Las áreas e índices estimados fueron:

- **Área construida y crecimiento urbano:** Se cuantificaron las áreas delimitadas en los mapas de uso del suelo urbano y su crecimiento sumando la cantidad de celdas correspondientes a cada categoría y periodo. Como la resolución de las capas matriciales es de 30 m, el área de cada celda es igual a 900 m<sup>2</sup>, que se multiplica por la cantidad de celdas de cada tipo.

---

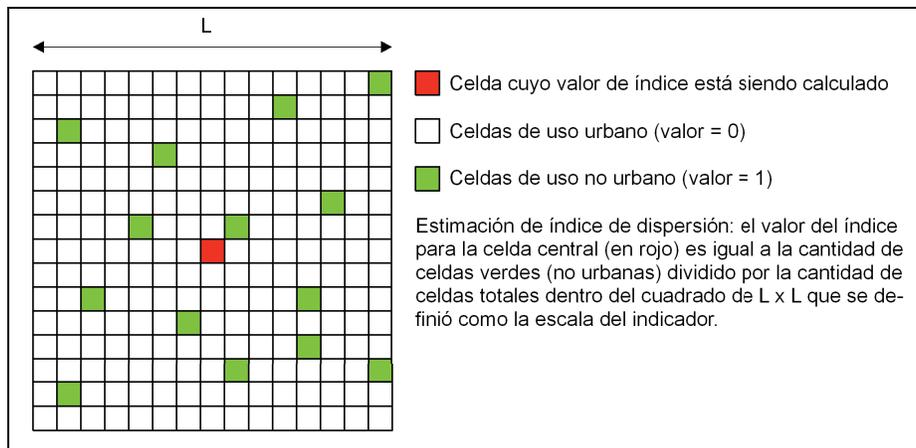
<sup>9</sup> No se llevaron a cabo comparaciones sistemáticas con imágenes de alta resolución, al estilo de Irwin y Bockstael (2008); pero la revisión de resultados mediante inspección visual y el conocimiento de campo de algunos de estos distritos rurales, claramente permitía identificar problemas con las estimaciones de área construida en muchos distritos.

**Figura 5. Variación de pendientes en la región metropolitana de San José**



- Área edificable:** De acuerdo con la Ley de Planificación Urbana, en áreas con pendientes a 30 por ciento requieren de estudios especiales de suelos antes de ser desarrollados. Por ello, se han adoptado como áreas desarrollables solo las que tienen pendientes menores al 30 por ciento. Este factor es constante en el tiempo y se deriva de la cartografía nacional<sup>10</sup>.

**Figura 6. Estimación esquemática del valor del índice de dispersión para una celda**



<sup>10</sup> Esta área incluye toda el área que, en principio, podría ser construida de acuerdo con la Ley de Construcciones independientemente de si está o no construida. El área edificable libre corresponde al área que cumple con las condiciones de pendiente y que no ha sido aún ocupada por construcciones; busca ser una medida aproximada del área disponible para futuro desarrollo. Existen otras restricciones legales y físicas (tales como restricciones a construcción sobre cauces de los ríos, fuentes de agua potable o fallas geológicas) que no fueron consideradas.

- **Índice de dispersión:** definido por Burchfield et al. (2006). Para todas las celdas que se analizan (todas celdas urbanas o todas las celdas correspondientes al crecimiento urbano), se estima el porcentaje de celdas no urbanas en una ventana de aproximadamente 1 km x km<sup>11</sup> centrada en la celda que se analiza. Posteriormente, se promedia el valor de todas las celdas (área construida total o crecimiento del área construida) para toda la región o alguna parte de ella (por ejemplo, un municipio). Si el valor es muy cercano a la unidad, los niveles de dispersión son muy altos porque el desarrollo urbano representado por la celda está aislado, o sea rodeado de muchas celdas no urbanas, es decir, alejado de las áreas construidas consolidadas. Inversamente, si el valor es muy bajo, el nivel de dispersión también lo es.
- **Índice de compacidad:** originalmente definido por Angel et al. (2005), se estima como el área construida consolidada principal, que es la mancha urbana contigua de mayor área de cada ciudad, dividida por el área desarrollable. Angel et al. (2005) definen el área desarrollable como el círculo de radio mínimo que contiene el área construida de la ciudad, excluyendo desarrollos muy dispersos (considerando solo áreas construidas que ocupen, contiguamente, 25 ha.) Este índice se modificó en el marco de este estudio: se calcula como el área construida de cada municipio dividida por el área total edificable (el área con una pendiente menor al 30 por ciento) de ese municipio.
- **Índice de contigüidad:** originalmente definido por Angel et al. (2005), se estima como el área de la mancha urbana continua más grande la ciudad dividida por el área construida total. Este índice se modificó en el marco de este estudio: se calcula el área construida contigua más grande dentro de los límites de un municipio, partido por el área construida total de ese municipio y para la región en su conjunto. Se supone que cada municipio está aislado en sus bordes del resto de la ciudad, es decir, que las manchas urbanas se interrumpen en el límite cantonal aún en los casos en que estas físicamente sean continuas. Se calcula el índice de compacidad como el área construida continua de mayor área (centrada en San José) dividida por el área construida total.

### **Evolución del crecimiento urbano en la región metropolitana de San José, 1986–2010**

El cuadro 2 resume un grupo de indicadores que describen la evolución del área construida en la región. Una primera y muy interesante característica es que, a diferencia de la tendencia global identificada por Angel et al. (2010a), la densidad poblacional *ha aumentado en la región*. Ciudades semejantes de América Latina (tales como Ciudad de Guatemala o Santiago de Chile, cuyas poblaciones son del orden de los 3 millones de habitantes y que se ubican en áreas montañosas) presentaron reducciones en su densidad poblacional: Guatemala pasó de 87 a 76 habitantes por ha entre 1980 y 2000; Santiago presentó durante ese periodo densidades de 98 hab/ha urbana en 1980; 113 en 1990; y 102 en 2000. En cambio, el aumento en San José ha pasado de 68 a 73 hab/ha por urbana entre 1986 y 2010.

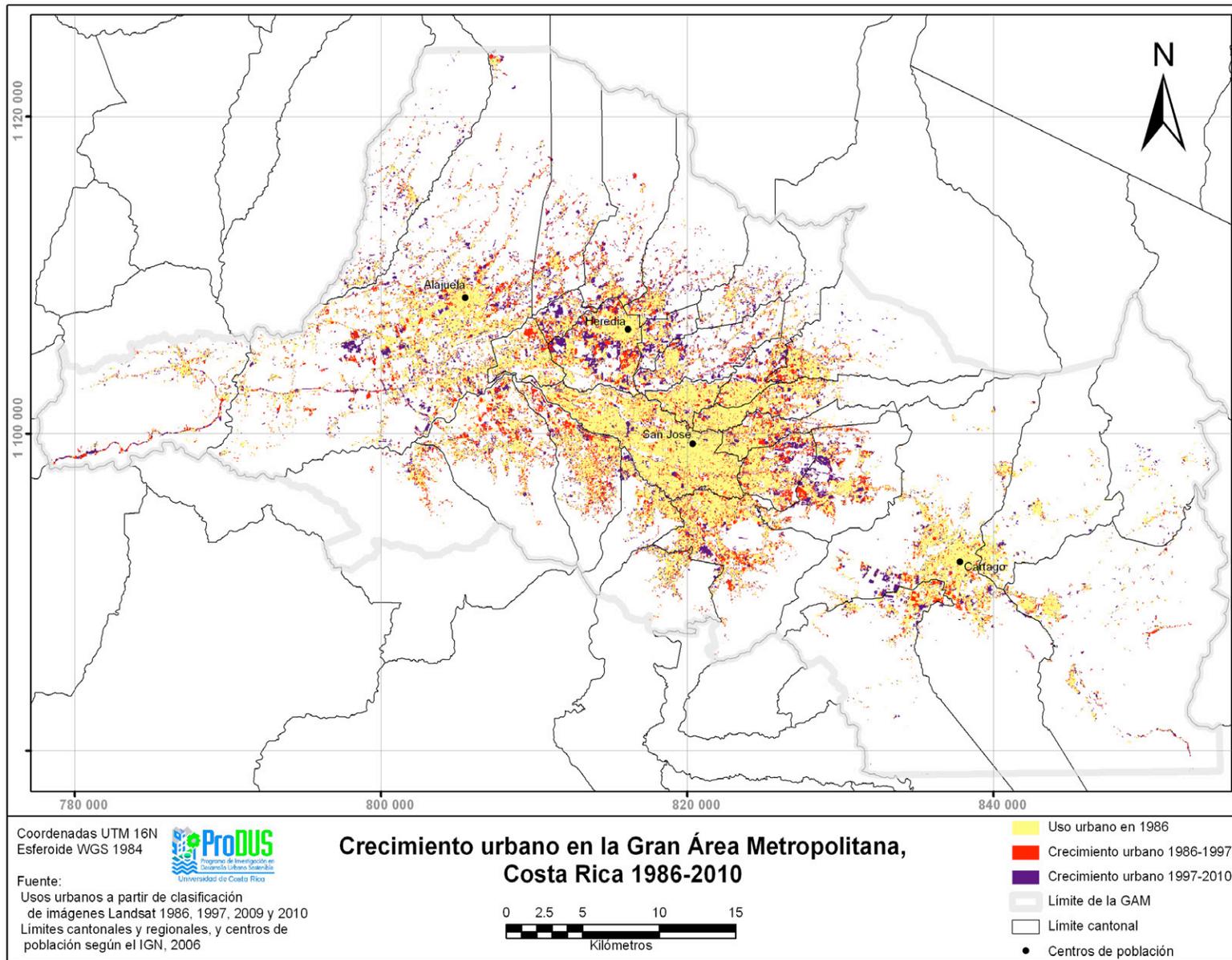
---

<sup>11</sup> Al igual que Burchfield et al. (2006) y dado que la resolución de la capa matricial que representa el área construida es de 30 m, se define la ventana como un cuadrado de 990 x 990 m (30 x 30 celdas).

Más generalmente, Angel et al. (2010a) afirmaron que “Esfuerzos para aumentar las densidades poblacionales de las ciudades requieren revertir una muy poderosa y sostenida tendencia mundial de reducción de esa densidad” (Angel et al., 2010a, p.103, traducido por los autores). Este ciertamente no parece ser el caso de la región metropolitana de San José. Pero nótese también una segunda diferencia con las tendencias regionales es que las densidades poblacionales de la región metropolitana de San José son menores que en otras ciudades de la región, aunque claramente mayores que en las ciudades de países más desarrollados. El origen de la región metropolitana como un conjunto de poblaciones rurales implica que siempre ha existido una enorme cantidad de espacio rural dentro de los límites de la región. Mucho de este espacio rural tuvo, durante años, características físicas y de accesibilidad similares a otras áreas desarrolladas. En este sentido, la evidencia sugiere que es precisamente esto el principal cambio: que el suelo no construido accesible y relativamente plano se está agotando en la región.

Una posible explicación a esta tendencia es que, debido a la rápida expansión en los bordes del área construida existente, las mejores áreas para desarrollar proyectos urbanos se hayan paulatinamente agotado. Si bien que dentro de los límites de la región metropolitana queda una gran área potencialmente construible, el relieve de la región crea importantes barreras para la expansión de redes de infraestructura (particularmente, de carreteras) y muchas de estas áreas albergan sistemas naturales estratégicos para la ciudad que podrían verse degradados (por ejemplo, los acuíferos al Noroeste de la región). Esto significa que los habitantes eventuales de nuevos desarrollos enfrentarán, probablemente, mayores costos de transporte que el conjunto de la población sin recibir necesariamente la compensación de mayores áreas de vivienda que predice el modelo teórico. No está claro que este proceso no planificado de densificación sea negativo, de modo que cualquier expansión de los sistemas de infraestructura pública, especialmente el sistema de carreteras regionales, debe estudiarse con cuidado.

## Crecimiento urbano en la Gran Área Metropolitana, Costa Rica 1986–2010



**Cuadro 2. Evolución del crecimiento urbano en la región metropolitana de San José**

| <b>Indicador</b>  | <b>1986</b> | <b>1997</b> | <b>2010</b> |
|---|-------------|-------------|-------------|
| Área construida (ha.)   | 20 986.5    | 27 044.9    | 33 088.1    |
| Crecimiento con respecto a periodo inicial (ha.)                              |             | 6058.4      | 6043.1      |
| Tasa de crecimiento interanual equivalente del área construida                |             | 2.33%       | 1.56%       |
| Población   | 1 434 242   | 1 931 255   | 2 493 076   |
| Densidad poblacional (habitantes / ha. urbana)                                | 68.34       | 71.41       | 75.35       |
| <b>Índices</b>  |             |             |             |
| Dispersión del área construida  | 0.5248      | 0.4457      | 0.3956      |
| Dispersión del área construida— índice modificado (según Angel et al., 2010b) | 0.5248      | 0.4850      | 0.4329      |
| Dispersión del crecimiento con respecto a periodo inicial                     |             | 0.4783      | 0.4768      |
| Compacidad del área construida  | 0.1712      | 0.2206      | 0.2699      |
| Contigüidad del área construida   | 0.3153      | 0.4216      | 0.4247      |

Esta hipótesis del agotamiento del área disponible se ve reforzada por el comportamiento de los índices que reflejan los niveles de dispersión y compacidad de la región. En general, esos índices muestran que (a) el crecimiento urbano ha ocurrido en los bordes de las áreas construidas existentes (los niveles de dispersión del crecimiento urbano son mayores que para el área construida en su conjunto) pero también, (b) al igual que en resultados previos (Burchfield et al., 2006; Angel et al., 2010b), los niveles de dispersión del crecimiento urbano son aproximadamente constantes en el tiempo (el índice de dispersión para el crecimiento urbano se mantuvo en alrededor de 0.477 para ambos periodos) y (c) el índice de dispersión para la región se redujo en el tiempo y los niveles de compacidad y contigüidad, en general, aumentaron. Esto significa que la región metropolitana de San José ha crecido mediante desarrollo de espacios vacíos en los bordes o dentro de áreas urbanas consolidadas (*infill*), y no mediante dispersión de desarrollos urbanos lejanos del área construida existente (*leapfrogging*)<sup>12</sup>.

De nuevo, es necesario resaltar que los niveles de dispersión para la región metropolitana de San José son relativamente mayores que en otras ciudades similares de América Latina. El índice de dispersión estimado para la región metropolitana de San José, utilizando el cuadrado de 990 m x 990 m de Burchfield et al. (2006), resulta en índices de dispersión del orden de 0.52 (1986) a 0.40 (2010). Atlanta y Pittsburgh, dos de las ciudades estadounidenses más dispersas, presentaban índices de 0.58 y 0.57, respectivamente, en el año 2000. Un índice mayor a 0.40 es

<sup>12</sup> Es decir, el proceso fundamental ha sido de ocupación de espacios probablemente baldíos – que eran abundantes por el proceso de conurbación con que se ha venido conformando el espacio urbano de la región. Posiblemente estos baldíos se originaron como los restos de antiguos paisajes rurales existentes entre núcleos de población. El punto fundamental es que la expansión del área construida ha sido más orgánica de lo que cabría esperar, dada la muy dispersa estructura de la región, aunque la dispersión original – con el consiguiente muy alto nivel de espacios baldíos – continúa dominando.

mayor que el de Los Ángeles (0.33 en 2000) o Houston (0.39 en 2000), véase Burchfield et al. (2006).

Angel et al. (2010b) modificaron el índice de dispersión, estimándolo con un círculo de radio 1 km:

- Usando el índice de dispersión de la región metropolitana de San José estimado en círculos de 1 km, se obtuvo 0.5248 (para 1986), 0.4850 (para 1997) y 0.4329 (para 2010).
- Angel et al. (2010b) reportan valores de 0.281 y 0.254 en Santiago de Chile; 0.383 y 0.323 para San Salvador, El Salvador; 0.387 y 0.314 en Ciudad de Guatemala; 0.296 y 0.268 en Guadalajara, México; 0.306 y 0.230 en Tijuana, México; 0.462 y 0.440 en Montevideo, Uruguay, y 0.487 y 0.433 en Caracas, Venezuela. En todos los casos, el primer valor es circa 1990 y el segundo, circa 2000.
- En cuanto a ciudades estadounidenses, de estructura mucho más dispersa y con baja utilización de transporte público, Angel et al. (2010b) estimaron 0.548 y 0.519 para Pittsburgh, 0.237 y 0.210 para Los Ángeles, y 0.503 y 0.365 para Houston. También, en todos los casos el primer valor es circa 1990 y el segundo, circa 2000.

Aunque no llega a presentar los niveles de dispersión estimados para las ciudades estadounidenses más extremas (que tienen una estructura completamente orientada a vehículos privados), sí resulta bastante claro que la región metropolitana de San José es considerablemente más dispersa que lo normal en América Latina. Ciudades físicamente similares como Ciudad de Guatemala o Santiago de Chile tienen índices de dispersión por debajo de 0.35 en tanto que el valor de San José, incluso en el 2010, está por encima de 0.40 (similar a Montevideo, con la diferencia de que Montevideo presenta un relieve mucho más plano que San José).

Debe realizarse como punto final un comentario sobre el significado del índice de dispersión según Burchfield et al. (2006), y en general sobre los resultados de las ciudades estadounidenses. Los índices (véase Burchfield et al., 2006; Angel et al., 2005, 2010a) fueron originalmente construidos para investigar el desarrollo urbano disperso tipo *sprawl* propio de Estados Unidos. Este fenómeno tiene causas y características tipológicas específicas: estructuras urbanas que han resultado de periodos muy largos de predominio de vehículos privados y bajos costos de transporte (véase Glaeser y Kahn, 2004 para una explicación formal). Véase Galster et al. (2001) y también Angel et al., 2010a que presentan discusiones interesantes al respecto.

En este sentido, aunque el índice mide dispersión en todos los casos, el tipo de desarrollo urbano medido varía entre un contexto y otro, y particularmente, entre Estados Unidos y Costa Rica. Altos índices de dispersión en Estados Unidos implican desarrollos urbanos de muy baja densidad, con las características propias del *sprawl*, tales como, ingresos altos y dependencia del automóvil.

En San José, la periferia regional ya estaba ocupada por núcleos de población cuya base económica<sup>13</sup> era rural. El desarrollo de urbanizaciones en la periferia en muchos casos sustituye fincas de café con usos urbanos. Los nuevos residentes generan más externalidades negativas que los habitantes rurales originales, en la medida en que se eliminan empleos agrícolas y los habitantes rurales son forzados a viajar a los centros urbanos para trabajar. Es decir, aumentan las externalidades negativas. La paradoja consiste en que estas urbanizaciones, al ser desarrollos relativamente importantes, reducen los niveles de dispersión (entendidos como el área no desarrollada que rodea cada localización). En este sentido, las reducciones en los índices de dispersión son más una señal del continuo proceso de conurbación antes que reducciones efectivas de la dispersión preexistente, y por lo tanto sugieren un aumento en los impactos ambientales del crecimiento urbano.

### **Determinantes de la estructura y crecimiento urbano en San José**

En esta sección, se resumen los resultados que buscan explorar la influencia de diversos factores sobre el crecimiento urbano y sus características en la región metropolitana de San José. Como se argumentó, este análisis, así como los estudios a escala meso en general, sirven como verificación de los supuestos que se realizan en modelos de escala macro (e.g. Burchfield et al., 2006; Angel et al., 2010a y 2010b). Los estudios de escala macro resumen índices y variables por ciudad o región y al hacerlo, implícitamente suponen que las relaciones fundamentales del modelo monocéntrico se aplican a la diversidad de situaciones que componen su base de datos. A escala meso, se verifica si este supuesto es verdadero para casos específicos. Adicionalmente, provee información útil tanto metodológica como sustantivamente.

La creación de modelos que expliquen la cantidad, crecimiento y estructura de los patrones de área construida en la región son importantes por dos razones. Primero, por sí mismos, permiten identificar factores que causan cambios en los niveles y estructura del área construida. Una mayor comprensión de los fenómenos asociados al crecimiento urbano permite guiar eficientemente las intervenciones sobre los mercados de tierras, tanto en su objetivo como en sus instrumentos y aplicación. Segundo, como exploración general del contexto en que ocurren fenómenos específicos, provee información crítica de las variables por las cuales debe controlarse para aislar apropiadamente el fenómeno. Particularmente, en el desarrollo de modelos causales es crítico identificar influencias que puedan confundir la medición del impacto cuya causalidad se investiga.

### **Determinantes del proceso de crecimiento urbano y el modelo de ciudades monocéntricas**

De acuerdo con Burchfield et al. (2006), los factores que determinan el crecimiento urbano y su forma pueden dividirse en dos grupos. Un primer grupo que representa las interacciones formalizadas en el modelo microeconómico de ciudades monocéntricas (que explica las acciones

---

<sup>13</sup> Nótese que conforme avanzó el proceso de conurbación, la estructura económica del empleo cambió en estos núcleos, incluso sin considerar los nuevos habitantes, Aumentó la proporción de personas que se incorporaron al mercado laboral urbano porque se redujeron los costos de transporte y los salarios urbanos son mejores que los salarios rurales. Además, y más generalmente, las oportunidades de interacción social son mayores y más diversas en las centralidades urbanas que en la interfaz periurbana.

de individuos y deriva de ellas consecuencias agregadas). Los aspectos más notables de estos factores incluyen la accesibilidad a centralidades, el ingreso familiar, la demanda por vivienda (que en el análisis de una ciudad aislada se supone como un factor exógeno), la regulación y la renta del suelo agropecuario (el costo de oportunidad). Un segundo grupo de estudios refleja las limitaciones del modelo de ciudades monocéntricas, específicamente el supuesto de isotropía del espacio.

Siguiendo el método de análisis probabilístico tradicional, se supone una relación causal basada en un argumento teórico sustantivo—el modelo de ciudad monocéntrica, tanto en sus derivaciones como en sus limitaciones. Los distintos factores determinantes, en el marco de este argumento, se conciben como variables independientes; y la variable dependiente refleja distintas formalizaciones de conceptos explicados por el modelo teórico. La idea central del modelo predice que las localizaciones centrales tienen rentas del suelo más altas, porque los costos de transporte para desplazarse desde distintos sitios a ellas son menores. Esto significa que la intensidad de uso del suelo es mayor en estas localizaciones centrales que más lejos del centro. Es decir, la densidad de actividades urbanas debe ser mayor y los niveles de dispersión, menores en localizaciones centrales.

Se han construido una serie de relaciones esperadas entre distintas variables y las características del desarrollo urbano. Estas fueron originalmente derivadas del modelo de Alonso-Mills-Muth y han adoptado los resultados de estudios anteriores (Burchfield et al., 2006; Angel et al., 2005; Deng et al., 2008). Las deducciones formales pueden encontrarse en desarrollos matemáticamente más rigurosos (e.g. Brueckner, 1987; Glaeser y Kahn, 2004; Glaeser, 2008).

En este análisis, las variables seleccionadas para representar la **accesibilidad** a lugares centrales fueron:

- **Distancia a San José.** Distancia entre el centro de San José y el centroide geométrico de la mancha urbana de la municipalidad, medida sobre la red de carreteras nacionales.
- **Distancia a ciudad.** Distancia entre el centro (la intersección entre las calle y avenida centrales—el centro histórico de cada una) de la ciudad (San José, Alajuela, Cartago o Heredia) y el centroide geométrico de la mancha urbana de la municipalidad<sup>14</sup>, medida sobre la red de carreteras nacionales. Los municipios de la región están citados en el anexo; si su código de cantón comienza con 1, pertenecen a la ciudad de San José; si comienzan con 2, a la ciudad de Alajuela, y si comienzan con 4, a la ciudad de Heredia. Cinco de los seis cantones cuyo código comienza con 3 pertenecen a la ciudad de Cartago, la excepción siendo el cantón de La Unión (303).
- **Distancia a zona industrial.** Distancia entre la más cercana de las zonas industriales principales (El Coyol, Ochomogo o Heredia-Belén) y el centroide geométrico de la mancha urbana de la municipalidad, medida sobre la red de carreteras nacionales.

---

<sup>14</sup> El centroide geométrico del área construida de un municipio fue estimado (a) transformando las áreas urbanas en polígonos, para cada uno de los cuáles se estimó un área ( $A_i$ ) y un centro de simetría con coordenadas  $(x_i, y_i)$ . Las coordenadas del centroide geométrico fueron estimadas como:  $x_c = \frac{\sum x_i \cdot A_i}{\sum A_i}$ , y análogamente para  $y_c$ .

En cuanto a accesibilidad, se espera que: (a) cuanto más lejana de centralidades importantes esté el municipio, mayor el nivel de dispersión del desarrollo urbano; (b) menor la densidad poblacional; (c) mayor el nivel de crecimiento urbano, porque los municipios más centrales deberían estar esencialmente ya urbanizados; y (c) los desarrollos urbanos más lejanos del centro serán comparativamente más dispersos.

La **demanda por área** en la ciudad se estimó a partir de:

- **Trabajadores (normalizado).** La cantidad de trabajadores formales por cantón, según datos de la Caja Costarricense del Seguro Social. Los datos asignados a 1986 fueron reportados en 1985 (en González, 1994; los datos de 1986 no estaban disponibles). Las variables fueron normalizadas, de acuerdo con la fórmula:

$$TRAB_{normalizados} = \frac{TRAB_{it} - \sum_i \sum_t TRAB_{it} / n}{desvest(TRAB_{it})} \quad [3]$$

donde n es 93 en modelos que incluyen tres periodos y 62, si incluyen 2.

- **Población estimada.** Población estimada por municipio, según las estimaciones conjuntas del Centro Centroamericano de Población (CCP), Universidad de Costa Rica y el Instituto Nacional de Estadística y Censos. Estos datos fueron descargados del sitio en Internet del CCP (<http://www.ccp.ucr.ac.cr/>).

En cuanto a la demanda por área, es de esperar que cuanto mayor la cantidad de trabajadores y pobladores, mayor el área construida y menor la dispersión del desarrollo urbano; igualmente, debería ser mayor y más compacto el crecimiento urbano.

Para medir el efecto de los **ingresos** en los hogares, se construyó un índice:

- **Índice de ingresos.** Se supone que el ingreso promedio cantonal es (a) proporcional en el espacio al consumo eléctrico residencial por cliente y (b) proporcional en el tiempo al PIB per capita en términos reales—pero *no* proporcional en el tiempo al consumo eléctrico residencial, pues el cambio tecnológico ha impactado fuertemente los niveles de consumo en las últimas tres décadas. A partir de estos principios, se ha definido un índice de ingreso promedio como:

$$Ing\ Pr\ el_{it} = \frac{QER_{it}}{promedio_t(QER_{it})} \cdot QERPROM_{1980} \cdot \frac{PIB_s}{PIB_{1985}} \quad [4]$$

$$IndIng_{it} = \frac{Ing\ Pr\ el_{it} - \sum_i \sum_t Ing\ Pr\ el_{it} / n}{desvest(Ing\ Pr\ el_{it})} \quad [5]$$

donde  $IngPrel_{it}$  es un índice preliminar que representa las variaciones del ingreso, el índice de ingresos final ( $IndIng_{it}$ ) es producto de normalizarlo;  $QER_{it}$  es el consumo eléctrico residencial del municipio i en el año t (con t siendo 1980, 2000 o 2008),  $promedio_t(QER_{it})$  es el consumo promedio del año t (tomando los valores de 31 municipios correspondientes al año t),  $QERPROM_{1980}$  es igual a la suma de  $QER_{i1980}/31$  (el promedio del consumo eléctrico residencial por cliente de los municipios en 1980),  $PIB_s$  el producto interno bruto en colones reales de 2010 en el año s (s siendo 1986, 1997

o 2010) y PIB<sub>1986</sub>, el producto interno bruto estimado de 1986 (en colones reales de 1991) y n es 93 para bases de datos con tres periodos y 62 para bases de datos con dos periodos.

No se encontraron datos de consumo eléctrico residencial para los años 1986, 1997 y 2010. Se utilizaron en su lugar, para 1986, los datos reportados en el diagnóstico del plan regional correspondientes a 1980 (INVU, 1983); para 1997, se utilizaron los datos del año 2000 y para el año 2010, se utilizaron datos de 2008. Estas bases de datos fueron recopiladas en el marco del diagnóstico socioeconómico de Costa Rica con base en información del Instituto Costarricense de Electricidad (aunque no forman parte del reporte mismo). Las estimaciones de PIB per capita se obtienen para 2000–2010, de las estimaciones del PIB obtenidas del Banco Central de Costa Rica en colones reales de 1991 (<http://www.bccr.fi.cr>). Las estimaciones de PIB para años anteriores se obtuvieron de “proyectar hacia atrás” utilizando las tasas de crecimiento del PIB ajustadas por Rodríguez-Clare et al. (2003).

Se espera que el nivel de ingresos promedio esté directamente relacionado con niveles de dispersión, tanto del área construida como del crecimiento urbano, y con menores niveles de densidad porque a mayor ingreso, menor restricción presupuestaria. Esto significa que los municipios con mayores ingresos en promedio probablemente tienen unidades habitacionales más grandes que municipios de menores ingresos.

El impacto de la **regulación regional** está representado por:

- **Porcentaje de área del municipio que está dentro del límite de crecimiento urbano.** En principio, la urbanización más allá de este límite (definido en 1982 por el plan regional) está prohibida y solo se permiten desarrollos residenciales en baja densidad, teóricamente para los productores agropecuarios que allí habitan. Sigue que el porcentaje de área dentro del límite de crecimiento debería estar relacionado con menores niveles de dispersión, cantidad y crecimiento del área construida.

El efecto de la **renta agropecuaria** fue incorporado a través de:

- **Uso agrícola hortalizas** (1 = sí): Municipios en los cuales, a partir de inspección visual de las imágenes Landsat, se observan cultivos de hortalizas.
- **Uso agrícola café** (1 = sí) : Municipios en los cuales, a partir de inspección visual de las imágenes Landsat, se observan cultivos de café muy cercanos y/o adyacentes a las áreas construidas identificadas.

Cuanto mayor la renta agrícola diferencial, menor la probabilidad de urbanización. Dado que las hortalizas son el más rentable de los cultivos en los bordes de la región, es de esperar que los municipios con cultivos de hortalizas tengan menores niveles de urbanización y dispersión que el resto de la región. En cambio, la urbanización y fraccionamiento de fincas de café es un proceso de larga data en la región (véase Hall, 1976). Además, se ha demostrado que el cultivo de café no puede evitar la urbanización, ni financieramente ni económicamente (Garita, 1994). De ahí que

sea razonable esperar, para los municipios en que predomina el cultivo de café, una ligeramente<sup>15</sup> mayor propensión a la urbanización exclusiva de otros efectos como accesibilidad.

Finalmente, se incluyen dos variables que reflejan el efecto de las **variaciones en el espacio**:

- **Pendiente promedio (%):** Estimado a partir de un mapa de pendiente, el cual idealiza el espacio como celdas de 30 m de lado. El valor asignado es igual al promedio de todas las celdas dentro de los límites de cada municipio. Cuanto más irregular un cantón, tanto más compacto debe ser el desarrollo urbano existente y tanto menor sus posibilidades de expansión.
- **Densidad de pozos (2 años).** Este factor ha sido identificado como importante en Burchfield et al. (2006), bajo el principio de que la posibilidad de extraer aguas subterráneas promueve la dispersión porque reduce los costos de infraestructura asociados a la expansión de acueductos. El efecto en la región metropolitana de San José de este factor debería verse considerablemente atenuado por la disponibilidad de abundante agua superficial en prácticamente toda la región. El indicador se estima a partir la cantidad de permisos de explotación de pozos aprobados en el año en cuestión y el año inmediatamente anterior (por ejemplo, para el año 1986, los permisos de 1985 y 1986) por el Servicio Nacional de Aguas, Riego y Avenamiento (SENARA). A partir de ellos, se estimó la densidad de pozos para un mapa de celdas de 30 x 30 m en un radio de 10 km a partir del centro de cada celda. Sobre este mapa continuo, se obtuvo el valor promedio de las celdas ubicadas dentro de los límites de cada municipio en cada periodo.

Nuestro enfoque analítico considera que un factor impacta la cantidad, crecimiento o estructura del desarrollo urbano si su coeficiente de regresión es significativo y presenta el signo esperado (en una regresión válida, o sea donde el estadístico *f* indica que los coeficientes son conjuntamente distintos de 0). Si el coeficiente de regresión es de signo contrario, debe revisarse tanto la teoría como la pertinencia de variables porque la suposición de causalidad descansa fuertemente sobre el argumento teórico del modelo.

Se compilaron dos bases de datos. En la base de datos de estructura urbana, se incluyeron 31 municipios como sección transversal y 3 periodos (1986, 1997 y 2010). Se utilizaron como variables dependientes: la densidad poblacional, y los índices de dispersión, compacidad y contigüidad del área construida total, así como todas las variables independientes. La segunda base de datos corresponde al crecimiento urbano, tiene 2 periodos y una sección transversal de 31 grupos (municipios). Como variables dependientes, se compilaron: crecimiento del área construida (área construida nueva) en ha, tasa de crecimiento interanual equivalente del área construida<sup>16</sup> y el índice de dispersión del crecimiento urbano. Se asignó como variable

<sup>15</sup> Los resultados del mapa *Precios del suelo y renta agrícola de cuatro cultivos. Análisis para la ciudad de Heredia*, sugieren que este efecto no es muy grande, dado que las rentas de la producción agropecuaria son sustancialmente menores que los valores del suelo.

<sup>16</sup> Estimada como:  $TasaCrecEq = \sqrt[p]{\frac{ÁreaUrbTotal_{final}}{ÁreaUrbTotal_{inicial}}} - 1$  con *p* la cantidad de años entre el año inicial y el final.

independiente la correspondiente al año inicial del periodo, bajo el supuesto de que las características del crecimiento son consecuencia de las variables que determinan la estructura urbana inicial de la ciudad.

### **Estrategia econométrica, limitaciones y extensions**

Las bases de datos fueron construidas como series de tiempo apiladas. La sección transversal está compuesta por municipios, para cada uno de los cuales se compilaron datos correspondientes a tres periodos. Como tales, comparte su estructura con datos tipo panel y están sujetas a los mismos sesgos—en particular, a la existencia de un componente de error asociado a la pertenencia a un grupo (municipio). Esto implica que, de aplicarse mínimos cuadrados ordinarios, los resultados obtenidos estarían sesgados por construcción.

Dada la estructura de las bases de datos, se han utilizado los desarrollos econométricos inferidos para datos de panel. Concretamente, se han estimado modelos de efectos aleatorios (Hsiao, 2003). El modelo de efectos aleatorios utiliza una transformación sobre los datos y un estimador ‘óptimo’ derivado en el marco de modelos mínimos cuadrados generalizados (véase Hsiao, 2003).

La decisión metodológica estándar en econometría de datos de panel consiste en seleccionar un enfoque, de efectos aleatorios o de efectos fijos. Sin embargo, los modelos desarrollados solo pueden ser estimados con efectos aleatorios porque algunas variables—notablemente variables físicas como distancias o pendientes—son constantes o casi constantes en el tiempo, y la estimación de efectos fijos no puede incluir variables con esta característica. Esta elección, el uso de efectos aleatorios, tiene una ventaja adicional: se considera que los modelos de efectos aleatorios, si bien menos robustos que el enfoque de efectos fijos, sí son más universales. Los modelos de efectos fijos son condicionales a la muestra, debido en parte a que los efectos fijos son representaciones de la ignorancia del investigador; en cambio, los modelos de efectos aleatorios se interpretan generalmente como una inferencia sobre la población (Hsiao, 2003)—en este caso, sobre la magnitud y características del desarrollo urbano por municipio en la región metropolitana de San José.

### **Estimación de modelos que describen el área construida y su estructura**

Los modelos de efectos aleatorios se estimaron sobre la base de datos que describe la estructura urbana de la región. Se utilizaron logaritmos naturales de la densidad poblacional (modelo 1), todas las distancias, la población estimada y la densidad de pozos. Otras variables son adimensionales. Así, los coeficientes de regresión pueden interpretarse como elasticidades. Todas las regresiones fueron estimadas con el programa R (R Development Core Team, 2011). El cuadro 4 resume los resultados para las variables dependientes que originan los modelos: densidad poblacional (modelo 1), índice de dispersión (modelo 2), índice de contigüidad (modelo 3) e índice de compacidad (modelo 4).

Los coeficientes de determinación son en general aceptables. Aún cuando el valor del coeficiente de determinación para densidad poblacional sea bajo, los otros modelos tienen  $R^2$  ajustados mayores a 0.50 (y a 0.70, en el caso de los índices de dispersión y contigüidad). Todos los

estadísticos  $f$  son significativos al 90 por ciento, claramente rechazando la hipótesis nula de que todos los coeficientes son 0.

En cuanto a las variables de distancia, la distancia a San José es significativa en todos los modelos; la distancia a zonas industriales, en los modelos 1 (densidad poblacional) y 2 (índice de dispersión) y la distancia a las ciudades, en los modelos 2, 3 y 4 (índices de dispersión, contigüidad y compacidad). La asociación entre los índices y la distancia a San José se comportó como se había anticipado de la teoría, o sea la densidad, contigüidad del desarrollo urbano y su compacidad son mayores cuanto más cercanos a San José, y los niveles de dispersión aumentan con la distancia a San José. La distancia al centro de cada ciudad también tiene una elasticidad negativa con respecto al índice de compacidad, de menor magnitud absoluta que la elasticidad de la distancia a San José, sugiriendo que la distancia a San José es un factor más dominante en la región.

Los coeficientes de regresión de distancia a las ciudades en los modelos 2 y 3 (índices de dispersión y contigüidad), en cambio, tienen signo contrario a lo esperado. Y en el modelo 1 (densidad poblacional) el coeficiente no es significativo. Esta variable parece relativamente débil, sea por su alto grado de correlación con distancia a San José o porque sustantivamente no tiene un impacto sobre el desarrollo. Nótese también que el estadístico  $t$  es consistentemente mayor para distancia a San José que para distancia a las ciudades. Esta segunda posibilidad podría implicar que la región metropolitana se ha integrado más fuertemente de lo que tradicionalmente se ha interpretado.

La distancia a los centros industriales de la región tiene una relación directa con la densidad poblacional. En principio esto es consistente con la localización periférica de las zonas industriales y sus requerimientos de áreas relativamente grandes y de bajos precios. La relación entre distancia a centros industriales y el índice de dispersión también es directa, contrario a lo que cabría esperar (pues dispersión y densidad poblacional deberían comportarse inversamente). Una posible explicación es que los desarrollos industriales mismos reduzcan los niveles de dispersión. En la región metropolitana de San José, los centros industriales tienen áreas relativamente grandes y son densos por necesidad (el suelo reservado para ellos es muy limitado, comparado con otros usos urbanos), y este efecto domina sobre otros mecanismos.

La población estimada es significativa para los modelos 2, 3 y 4 (en el modelo 1 no se incluye por endogeneidad; la densidad se estimó como población entre área construida). Los signos mostraron los valores esperados: negativo para el modelo 2 (cuanto mayor la población, menos dispersa el área construida) y positivo para los modelos 3 y 4. La variable trabajadores no es significativa en el modelo 2 (índice de dispersión); y muestra signos ambiguos, pese a ser significativa, en los modelos 3 y 4—es positiva en el modelo 3 (índice de contigüidad) y negativa en el modelo 4 (índice de compacidad).

El índice de ingresos, en general, se comporta contrario a lo que cabría esperar: a mayores ingresos, menor dispersión, y mayor contigüidad y compacidad. Este resultado sugiere que los hogares de mayores ingresos privilegian la accesibilidad por sobre el área de su vivienda, proceso que puede haberse reforzado con los crecientes niveles de congestión que sufre la región. Por otra parte, debe recordarse que esta variable es un indicador (*proxy*) de una

distribución. La variable propiamente es ingreso del hogar, que debería presentar una gran variabilidad intramunicipal. Así, el resultado también podría ser consecuencia de las limitaciones del indicador, aspecto que debería explorarse con datos más desagregados.

**Cuadro 4. Determinantes de la estructura urbana de la región metropolitana de San José, 1986–2010**

| <b>Variable</b>                  | <b>Modelo 1</b><br><i>Densidad poblacional</i> | <b>Modelo 2</b><br><i>Índice de dispersión</i> | <b>Modelo 3</b><br><i>Índice de contigüidad</i> | <b>Modelo 4</b><br><i>Índice de compacidad</i> |
|----------------------------------|--|--|---|--|
| Intercepto                       | <b>6.2186</b><br>(4.190)                       | -0.4285<br>(0.806)                             | 0.0645<br>(0.125)                               | 1.4183<br>(1.529)                              |
| Distancia a San José             | <b>-0.3454</b><br>(3.311)                      | <b>0.1672</b><br>(5.031)                       | <b>-0.0940</b><br>(2.925)                       | <b>-0.1959</b><br>(3.369)                      |
| Distancia a ciudad               | -0.0844<br>(1.652)                             | <b>-0.0249</b><br>(1.985)                      | <b>0.0308</b><br>(2.167)                        | <b>-0.0176</b><br>(0.600)                      |
| Distancia a zona industrial      | <b>0.2045</b><br>(2.198)                       | <b>0.0574</b><br>(2.078)                       | 0.0138<br>(0.507)                               | 0.0133<br>(0.264)                              |
| Trabajadores (normalizado)       | -0.0229<br>(0.561)                             | 0.0018<br>(0.167)                              | <b>0.0199</b><br>(1.687)                        | <b>-0.0397</b><br>(1.679)                      |
| Población estimada               | –  | <b>-0.0869</b><br>(5.329)                      | <b>0.0465</b><br>(2.769)                        | <b>0.0931</b><br>(2.921)                       |
| Índice de ingresos               | -0.0356<br>(1.216)                             | <b>-0.0240</b><br>(3.470)                      | <b>0.0256</b><br>(3.206)                        | <b>0.0654</b><br>(3.765)                       |
| Pendiente promedio               | -0.0057<br>(0.406)                             | 0.0023<br>(0.520)                              | 0.0043<br>(1.021)                               | 0.0018<br>(0.232)                              |
| Densidad de pozos (2 años)*      | <b>-0.0867</b><br>(2.908)                      | <b>0.0189</b><br>(3.157)                       | <b>-0.0137</b><br>(1.910)                       | <b>-0.0161</b><br>(0.996)                      |
| Porcentaje de área dentro de LCU | -0.2081<br>(0.924)                             | -0.0806<br>(1.164)                             | <b>0.4803</b><br>(7.184)                        | <b>0.1954</b><br>(1.606)                       |
| Uso agrícola hortalizas (1 = sí) | <b>0.2586</b><br>(1.706)                       | -0.0332<br>(0.715)                             | -0.0134<br>(0.298)                              | -0.0280<br>(0.343)                             |
| Uso agrícola café (1 = sí)       | 0.0402<br>(0.552)                              | <b>0.0610</b><br>(3.972)                       | <b>-0.0502</b><br>(2.771)                       | <b>-0.0897</b><br>(2.261)                      |
| Estadístico f                    | <b>4.717</b><br>(10 y 82 g.l.)                 | <b>40.884</b><br>(11 y 81 g.l.)                | <b>43.309</b><br>(11 y 81 g.l.)                 | <b>16.175</b><br>(11 y 81 g.l.)                |
| R2 ajustado                      | 0.322  | 0.738  | 0.855   | 0.599  |
| Theta                            | 0.455  | 0.697  | 0.598   | 0.451  |
| N                                | 93   | 93   | 93  | 93   |

\* Las variables corresponden al año inicial del periodo de crecimiento.

Todos los índices estimados para el área construida total. Índice de dispersión según Burchfield et al. (2006)—utilizando vecindad cuadrada para cada celda urbana.

**En negrita:** significativo a un 90 por ciento de confianza.

La densidad de pozos se comporta también como se predijo en la teoría. Verificase que mayor densidad de pozos—que es donde más fácilmente se pueden explotar recursos hidrogeológicos— se asocia con desarrollos más dispersos, menos densos, menos compactos y menos contiguos. Es significativa en todos los casos, aunque la elasticidad (como también cabía esperar) es modesta: del orden del 1 a 2 por ciento para los tres índices (compárese con las elasticidades de distancia a San José, que son de magnitudes 5 a 10 veces mayores). La pendiente promedio, en cambio, no es significativa en ningún caso.

En cuanto a regulación, la variable no es significativa en los modelos de densidad poblacional (1) e índice de dispersión (2) pero sí en los modelos de contigüidad (3) y compacidad (4). En estos es positiva y muy fuerte. En el caso del modelo de compacidad, es posible algún sesgo por endogeneidad, pues el límite de crecimiento fue definido, entre otras cosas, para incluir las zonas más planas de la región<sup>17</sup>. En el caso del modelo 3 (índice de contigüidad), el coeficiente refleja que las principales manchas urbanas de la ciudad están en las localizaciones centrales.

Finalmente, en cuanto a la renta agrícola: ambas variables reflejan el mismo fenómeno, cual sea, que cuando la renta agrícola es alta, en este caso cuando se cultivan hortalizas, la urbanización es baja; e inversamente, cuando la renta es baja, en el caso en donde existen cafetales, la urbanización es alta. Cuando una variable es significativa, la otra no lo es. En cuanto a densidad poblacional (modelo 1), los municipios en que se cultivan hortalizas son un 25 por ciento más densos. En relación al índice de dispersión (modelo 2), las zonas cafetaleras tienen áreas construidas más dispersas; igualmente, las elasticidades de esta variable categórica (cultivo de café) son significativas y negativas en cuanto a contigüidad (modelos 3) y compacidad (modelo 4).

### **Estimación de modelos que describen el crecimiento urbano y su estructura**

Los modelos de efectos aleatorios también fueron estimados sobre la base de datos que describe el crecimiento urbano de la región (cuadro 5). Se utilizaron logaritmos naturales del área construida total (modelo 5) y de las tasas de crecimiento interanual equivalente (modelo 6), así también de todas las distancias, la población estimada y la densidad de pozos. Otras variables son adimensionales. Por ello, los coeficientes de regresión pueden interpretarse como elasticidades. Todas las regresiones fueron estimadas con el programa R (R Development Core Team, 2011). Las variables dependientes de los modelos son: crecimiento urbano (área construida nueva en ha), tasa de crecimiento interanual equivalente e índice de dispersión. Las tasas de crecimiento se expresan en porcentajes pero su distribución es tan asimétrica que existen muy pocas probabilidades de que haya valores incluso de dos dígitos. Es decir, la distribución de esta variable dista mucho de ser normal y por ello, las elasticidades estimadas cuando se utiliza sin haber aplicado una transformación logarítmica son muy bajas.

En general, los modelos que explican el crecimiento urbano tiene coeficientes de determinación menores que sus contrapartes de estructura urbana, algo consistente con los resultados iniciales

---

<sup>17</sup> El límite de crecimiento fue definido por distintos criterios según el contexto físico. Hacia el sur, el criterio determinante fue el valor de pendiente; en otras zonas, se tomó en cuenta la importancia de las zonas agropecuarias para la región así como la protección de zonas de recarga de acuíferos (véase INVU, 1983).

de Angel et al. (2005). Todos ellos son mayores a 0.50 y en el caso del índice de dispersión, es incluso mayor a 0.70.

Las elasticidades de las distancias a San José con respecto a las tres variables (área construida, tasa de crecimiento e índice de dispersión) son todas positivas y significativas. Se sigue de ello que la expansión de la región ocurre en los municipios alejados de San José. La distancia al centro de cada ciudad, en cambio, es negativa en el modelo 6 (tasa de crecimiento interanual equivalente). Esto sugiere la existencia de interacciones entre las variables de accesibilidad y el área metropolitana. Para el área metropolitana de San José, el crecimiento ocurrió en cantones periféricos (relación inversa entre distancia al centro y crecimiento del área construida). Para Alajuela, Cartago y Heredia, el crecimiento ocurrió en los cantones centrales, en los cuales todavía quedaban espacios con buena accesibilidad sin construir que fueron ocupados (especialmente en Heredia). Los cantones centrales de Alajuela, Cartago y Heredia están tan alejados de San José o más como los cantones periféricos de su área metropolitana. De ahí se explica porque (a) la elasticidad de distancia con respecto a San José haya resultado positiva y (b) una vez normalizado este efecto, la distancia al centro de cada ciudad haya resultado negativa. Nótese que el coeficiente de regresión de distancia al centro de la ciudad no es estadísticamente diferente de 0 para los modelos 5 y 7, aunque el parámetro mismo resultara negativo.

Los efectos de la población sobre el crecimiento son significativos para los tres modelos. El área construida nueva está positivamente relacionada con la población (o sea, el área construida en términos absolutos es mayor en donde viven más personas). También está negativamente relacionada con la tasa de crecimiento y con los niveles de dispersión de ese crecimiento. Ambas condiciones son consistentes con expansiones rápidas de áreas construidas originalmente pequeñas y, por eso mismo, más dispersas porque están rodeadas de amplias áreas no urbanas.

Los municipios de mayores ingresos crecen más rápidamente. Esto es sustantivamente coincidente con la evidencia empírica sobre acceso a crédito hipotecario, que solo es eficiente para los sectores de altos ingresos (véase Pujol et al., 2009; Román, 2008). En efecto, se ha demostrado que más de la mitad de los hogares costarricenses no tiene ingresos suficientes para acceder al crédito hipotecario. Sin embargo, el Estado ha visto reducido sistemáticamente su rol como proveedor de vivienda social, al punto de que el mercado inmobiliario pasó de una relación de 1:1, a finales de la década de 1980, entre viviendas construidas por el sector privado vs. público a una relación de menos de 8 a 1 durante la última década (Pujol et al., 2009). De ahí que la ciudad solo crezca principalmente para los sectores de mayores ingresos. En cambio, esta variable no es significativa para las tasas de crecimiento ni para los niveles de dispersión del crecimiento urbano.

También la renta agrícola es esencialmente coincidente con lo que cabe esperar de la teoría: los municipios con cultivos de alta renta (hortalizas) presentan menos crecimiento en términos absolutos y menores tasas de crecimiento, aunque este factor no incide sobre el nivel de dispersión del crecimiento urbano que sí ocurre. En cambio, los municipios donde predomina el café son significativos en los tres modelos y sus coeficientes tienen signos también coincidentes con las realidades históricas de la región. Donde existe mucho café, hay mayor crecimiento, mayor ritmo de crecimiento y el crecimiento urbano que ocurre es más disperso.

**Cuadro 5. Determinantes del crecimiento urbano  
de la región metropolitana de San José, 1986–2010\***

| <b>Variable</b>                  | <b>Modelo 5</b><br><i>Área<br/>construida<br/>nueva</i> | <b>Modelo 6</b><br><i>Tasa de crec.<br/>interanual<br/>equivalente</i> | <b>Modelo 7</b><br><i>Índice de<br/>dispersión</i> |
|----------------------------------|---|--|--|
| Intercepto                       | <b>-6.9762</b><br>(2.173)                               | <b>-4.7587</b><br>(2.110)  | <b>-1.2350</b><br>(-2.734)                         |
| Distancia a San José             | <b>0.6118</b><br>(3.072)                                | <b>0.2397</b><br>(1.712)   | <b>0.1955</b><br>(6.975)                           |
| Distancia a ciudad               | -0.1811<br>(1.492)                                      | <b>-0.1886</b><br>(2.238)  | -0.0013<br>(-0.075)                                |
| Distancia a zona industrial      | 0.1498<br>(0.807)                                       | <b>0.2297</b><br>(1.772)   | <b>0.0510</b><br>(1.955)                           |
| Trabajadores (normalizado)       | 0.0879<br>(0.764)                                       | -0.0187<br>(0.229)   | <b>0.0393</b><br>(2.415)                           |
| Población estimada               | <b>0.5732</b><br>(4.694)                                | <b>-0.2397</b><br>(2.782)  | <b>-0.0446</b><br>(-2.591)                         |
| Índice de ingresos               | <b>0.1553</b><br>(1.883)                                | 0.0468<br>(0.687)  | 0.0038<br>(0.309)                                  |
| Pendiente promedio               | <b>0.0508</b><br>(1.892)                                | 0.0308<br>(1.605)  | -0.0032<br>(-0.848)                                |
| Densidad de pozos (2 años)**     | <b>0.2184</b><br>(2.118)                                | 0.0020<br>(0.026)  | -0.0029<br>(-0.195)                                |
| Porcentaje de área dentro de LCU | 0.2673<br>(0.647)                                       | 0.1213<br>(0.419)  | <b>-0.1825</b><br>(-3.139)                         |
| Uso agrícola hortalizas (1 = sí) | <b>-0.9145</b><br>(2.994)                               | <b>-0.7213</b><br>(3.326)  | 0.0020<br>(0.046)                                  |
| Uso agrícola café (1 = sí)       | <b>0.5259</b><br>(3.510)                                | <b>0.5646</b><br>(4.840)   | <b>0.0449</b><br>(2.053)                           |
| Estadístico f                    | <b>9.310</b><br>(11 y 50 g.l.)                          | <b>7.808</b><br>(11 y 50 g.l.)   | <b>32.294</b><br>(11 y 50 g.l.)                    |
| R2 ajustado                      | 0.542   | 0.510  | 0.707  |
| Theta                            | 0.319   | 0.136  | 0.266  |
| N                                | 62  | 62   | 62   |

\* Las variables independientes corresponden al año inicial del periodo de crecimiento.

\*\* Cantidad de permisos de explotación de agua subterránea mediante pozos aprobados por el SENARA en el año inmediatamente anterior y durante el mismo año en que se asigna el dato.

Índice de dispersión estimado solamente para área de crecimiento urbano. Índice de dispersión según Burchfield et al. (2006)—utilizando vecindad cuadrada para cada celda urbana.

**En negrita:** significativo a un 90 por ciento de confianza.

Cabe un último comentario sobre las magnitudes de las elasticidades: para el área construida (modelo 5), las elasticidades son todas relativamente altas. Esto sugiere que existen muy importantes diferencias en cuanto al área de crecimiento de cantones con diversas características. En general, las elasticidades para la tasa de crecimiento interanual equivalente (modelo 6) son menores, excepto para los usos del suelo. Es posible que el costo de oportunidad, por una parte, y el uso del cultivos de café como forma de especulación inmobiliaria por otra tengan un rol importante en los procesos de expansión del área construida. En cambio, los niveles de dispersión de ese crecimiento están determinados fundamentalmente por accesibilidad medida en términos de la distancia a San José.

## **Discusión de resultados seleccionados**

### **De cultivo de café a urbanización: una perspectiva histórica**

Los resultados sobre mayor propensión a la urbanización de municipios “cafetaleros” son incipientes y deben ser analizados con cuidado. Se requerirán modelos específicos no solo de cambio de uso del suelo (incorporando usos no urbanos explícitamente) sino también de una más profunda comprensión de las relaciones entre agentes económicos, así como sus incentivos.

Una posible hipótesis sobre la propensión de las zonas cafetaleras a ser urbanizadas antes que otros usos agrícolas, se refiere a la capacidad especulativa de sus dueños, su capacidad de incorporar dentro del precio del suelo la expectativa de urbanización más eficientemente que otros propietarios. Exclusivo de posibles efectos de accesibilidad, esto significaría que las dinámicas productivas del sector cafetalero, por razones económicas pero también culturales e históricas<sup>18</sup>, resultan en una relación más estrecha entre el mercado inmobiliario urbano y la oferta de tierra para urbanizar en los paisajes de la región históricamente dominados por café.

Los modelos teóricos de localización en ciudades monocéntricas predicen expansión de la ciudad, mediante aumento de su dispersión y reducción de su densidad, cuando la renta agrícola del borde es menor que el precio del suelo en la ciudad misma. Si bien es cierto se ha demostrado que el límite de crecimiento urbano reduce el valor del suelo (Pérez et al., 2011; Pujol & Pérez, 2012), también es claro que este no segmenta el mercado inmobiliario en rural y urbano. La especulación en las zonas rurales periféricas implica que el valor del suelo en estas localizaciones ya ha incorporado por lo menos parte de la expectativa de su eventual urbanización. Paradójicamente, los altísimos niveles de especulación del mercado de suelo regional pueden estar contribuyendo a bloquear precisamente la misma urbanización que generó esa expectativa de alta renta en primer lugar.

---

<sup>18</sup> El café fue el producto de exportación tradicional, sobre el cual se construyó la prosperidad costarricense de la segunda mitad del siglo XIX. Los grandes productores cafetaleros controlaron el proceso de beneficiado del café y crearon capitales importantes, que posteriormente (ya en el s. XX) fueron invertidos en otros negocios, entre ellos, banca y finanzas. Este no es el caso de la producción hortícola o ganadera. Estas relaciones históricas podrían haber facilitado el tránsito de finca cafetalera a desarrollo urbano (residencial o comercial) para muchos dueños de plantaciones de café.

Sin embargo, debe resaltarse que existe un muy alto grado de endogeneidad—también históricamente generada—entre accesibilidad y producción cafetalera. La promoción del cultivo de café a partir de 1840 modificó los patrones demográficos históricos de la región. La población evolucionó de vivir en aldeas y producir en “tierras del común”, como había hecho durante la Colonia, a privatizar tierras públicas y producir café en ellas. Conforme las tierras cercanas a una aldea fueron totalmente ocupadas, las nuevas familias tendieron a emigrar y transformar nuevas tierras vírgenes en fincas de café (Gudmunson, 2010). Este proceso implicó la creación de trochas entre la aldea original y las nuevas tierras. Este sistema de trochas fue eventualmente mejorado para transportar más eficientemente la producción de café, y se convirtió en la base del sistema de carreteras locales<sup>19</sup>.

### **Renta agrícola y crecimiento urbano**

Los modelos espacialmente explícitos de transformación de uso del suelo (véase entre otros Irwin & Geoghegan, 2001) proponen que la conversión de usos no urbanos a urbanos de una parcela ocurre cuanto, para el agente económico (dueño del suelo) los beneficios netos del desarrollo urbano exceden la renta neta esperada de mantener el uso como no urbano indefinidamente. Este proceso ocurre durante el periodo en que el beneficio neto de la conversión menos el costo de oportunidad excede el beneficio neto de la conversión, descontado, del periodo inmediatamente siguiente. Es decir, si el dueño de la propiedad puede obtener mayores beneficios esperando, dado que el valor del suelo urbano crecerá sin su intervención, la conversión se retrasará.

El mapa “Precios del suelo y renta agrícola de cuatro cultivos. Análisis para la ciudad de Heredia” desarrolla la comparación entre el precio (renta) del suelo y la renta agropecuaria que generan los cuatro cultivos antes mencionados. Para Heredia, Pujol & Pérez (2012) estimaron un modelo econométrico con efectos espaciales que demuestra el impacto del límite de crecimiento sobre el uso del suelo. Este modelo permite predecir un mapa de valores (precios) del suelo para toda el área metropolitana de Heredia. Los resultados están expresados en dólares de EEUU reales, base 2007 = 100.

El mapa resultante fue analizado para identificar las áreas en que la renta agropecuaria excediera el valor del mercado (precio del suelo) en Heredia. Cuando esto sucede, la mejor decisión de un propietario es producir el cultivo y no urbanizar. Se encontró que:

- Las rentas agropecuaria de los cultivo de café, que en 2007 representaba un valor presente (suponiendo 30 años de tenencia de la tierra) de  $\$6.8/m^2$ , y caña ( $\$7.4/m^2$ ) eran menos de un tercio del precio mínimo del suelo en Heredia ( $\$24/m^2$ ).
- La renta agropecuaria del cultivo de papa ( $\$28/m^2$ ) y cebolla ( $\$49/m^2$ ) sí es mayor que el valor mínimo del precio del suelo en Heredia. El valor del percentil 20 para el mapa de precio del suelo es igual a  $\$28/m^2$ —lo cual indica que solo en unas pocas zonas aisladas

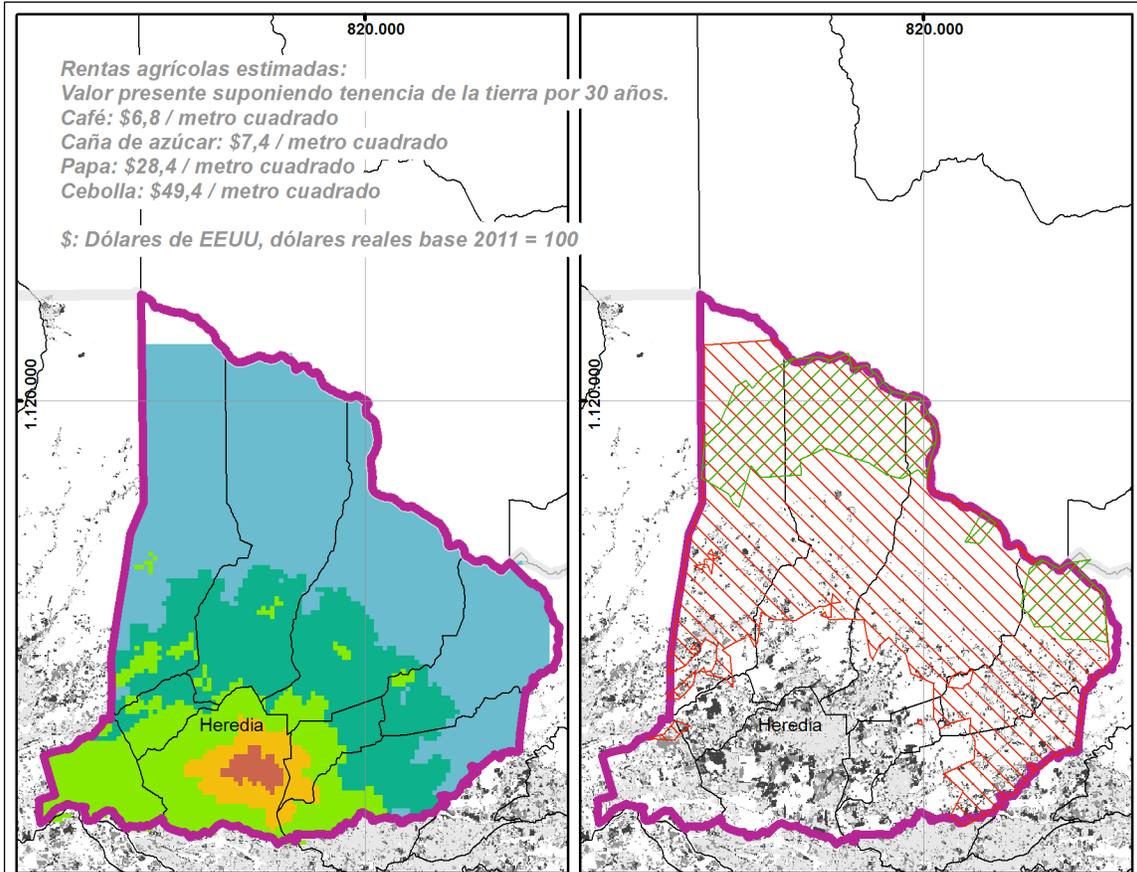
---

<sup>19</sup> No así del sistema de carreteras regionales, cuya estructura fue definida por la necesidad de conectar la región metropolitana con otras zonas del país: las rutas nacionales 10 y 32 con la costa del Caribe; las rutas nacionales 1 y 27 con la costa del Pacífico, la provincia de Guanacaste y las poblaciones del oeste del Valle Central; la ruta nacional 2, con el Valle de El General y el Pacífico Sur de Costa Rica.

al norte del área metropolitana puede competir el cultivo de papa con la urbanización. Para el caso de cebolla, \$49/m<sup>2</sup> es igual al percentil 60 del mapa de precio del suelo, lo cual implica un área mayor. Igualmente, corresponde a las localizaciones menos accesibles, en su mayoría ubicadas más allá del límite de crecimiento urbano.

- Debe resaltarse que tanto la producción de papa como la de cebolla son extraordinariamente rentables en Costa Rica en parte porque están protegidas de la competencia de los mercados internacionales por aranceles y en parte por razones de escasez. Las áreas sembradas de papa y cebolla en Costa Rica han sido apenas entre un 2 y un 6 por ciento del área total de café durante las últimas dos décadas (véase SEPSA, 2012). De modo que, en sentido estricto, de aumentarse el área porque muchos propietarios de la región decidan dedicarse a estos cultivos, los precios de estos cultivos, y con ellos su renta neta, probablemente se reduzcan sustancialmente.

## Precios del suelo y renta agrícola de cuatro cultivos. Análisis para la ciudad de Heredia



- Área metropolitana de Heredia
  - Límite cantonal
  - Uso urbano en 1986
  - Crecimiento urbano 1986-1997
  - Crecimiento urbano 1997-2010
- Precio del suelo  
 \$US de 2007 por m<sup>2</sup>
- 25 - 40
  - 40,1 - 80
  - 80,1 - 120
  - 120,1 - 145
  - 145,1 - 243,9
- Renta agrícola de cebolla mayor que precio del suelo
  - Renta agrícola de papa mayor que precio del suelo

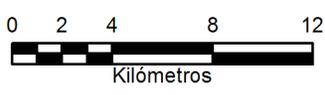


**Metodología:**  
 Los valores del suelo fueron estimados utilizando el modelo que cuantifica el gradiente de precio (renta) del suelo en la ciudad de Heredia (Pujol & Pérez, 2012). Este modelo incluye autocorrelación espacial en el término de error.  
 Los valores de tiempo de viaje al centro de Heredia fueron estimados con un modelo espacial con celdas de 5m de ancho, que fueron resumidos para la extrapolación a celdas de 180m para reducir la cantidad de datos. Por razones computacionales, la base de datos resultante se utilizó para predecir el precio del suelo dividida en cinco partes de igual tamaño (cantidad de registros).  
 La renta agropecuaria se estima como el valor agregado de cada cultivo dividido por el área sembrada. Es un promedio nacional.

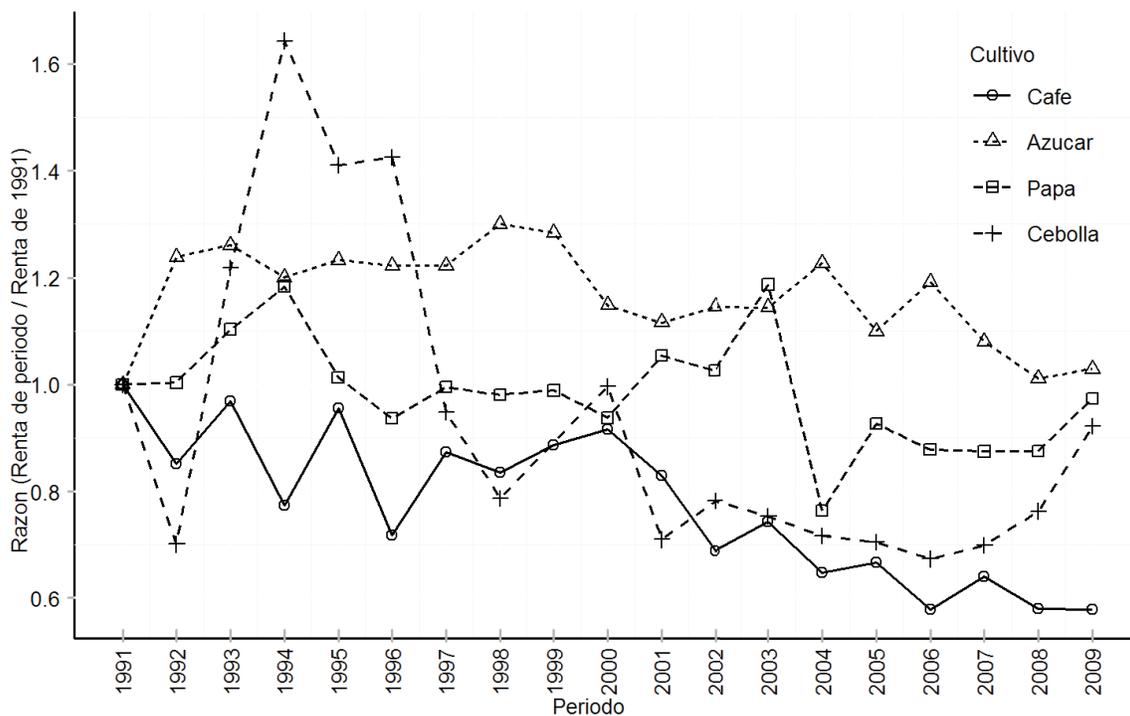
Fuente:  
 Usos urbanos según imágenes Landsat 1986, 1997, 2009 y 2010  
 Límites y poblaciones según el IGN, 2006  
 Valores del suelo: Pujol y Pérez, 2012  
 Renta del suelo: a partir de SEPSA, 2009

## Precios del suelo y renta agrícola de cuatro cultivos Análisis para la ciudad de Heredia

Coordenadas UTM 16N  
 Esferoide WGS 1984



**Figura 7. Evolución de la renta agrícola por cultivo en Costa Rica, 1991–2009**



Renta agrícola

\$EEUU/m2

|              |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Cebolla      | 70   | 49   | 86   | 116  | 99   | 100  | 67   | 55   |      | 70   | 50   | 55   | 53   | 50   | 49   | 47   | 49   | 53   | 65   |
| Papa         | 32   | 32   | 35   | 38   | 32   | 30   | 32   | 31   | 32   | 30   | 34   | 33   | 38   | 24   | 30   | 28   | 28   | 28   | 31   |
| C. de azucar | 6    | 8    | 8    | 8    | 8    | 8    | 8    | 8    | 8    | 7    | 7    | 7    | 7    | 8    | 7    | 8    | 7    | 6    | 7    |
| Cafe         | 10   | 8    | 10   | 8    | 10   | 7    | 9    | 8    | 9    | 9    | 8    | 7    | 7    | 6    | 7    | 6    | 6    | 6    | 6    |
|              | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 |

Nota: Estimado como valor agregado de la producción agrícola entre área sembrada estimada. Renta anual por ha. originalmente en colones reales de 1991, deflatada a colones reales de 2011 y estimada en dólares de EEUU con el tipo de cambio de julio de 2011. Valor presente de la renta agrícola estimada como renta anual por 30 años (supone tenencia de la producción por 30 años)

Fuente: Boletines estadísticos de la Secretaría de Planificación del Sistema Agropecuario (SEPSA), <http://www.infoagro.go.cr/boletines.htm>.

Los datos claramente sugieren que los beneficios de usos urbanos, representados por vender parcelas como construcciones en el mercado inmobiliario regional, exceden la suma de costos de transformación y el costo de oportunidad. Puede especularse sobre las razones que han bloqueado este cambio. Los valores del suelo en Heredia presentan una tendencia creciente (Pérez et al., 2011); las tasas de interés del mercado financiero costarricense son relativamente altas, lo cual implica que el descuento de ingresos futuros reduce significativamente el valor presente de estos, (el capital puede ser invertido con altas tasas de retorno en actividades

alternativas al desarrollo urbano), y la regulación regional restringe los usos del suelo permisibles en gran parte de la periferia (Pujol & Pérez, 2012). Una mejor descripción de las dinámicas agregadas de transformación del uso del suelo en la periferia, usando modelos espacial-estadísticos, puede contribuir a esclarecer los mecanismos de este cambio.

Debe señalarse que, si bien es cierto las condiciones descritas para Heredia son representativas de la mayor parte de la región, sí existen numerosas zonas donde los valores del suelo son menores que en Heredia. Notablemente, en promedio, el precio del suelo en Alajuela y Cartago probablemente sea menor que en Heredia.

### **Infraestructura, regulación y crecimiento urbano**

Los mapas “Cobertura del alcantarillado sanitario de San José, Costa Rica” y “Área construida y regulación de la región metropolitana de San José, Costa Rica,” en conjunto con la figura 8, muestran la superposición entre el crecimiento urbano y sistemas de infraestructura así como con la regulación regional.

La ciudad de San José está en su mayoría cubierta por el alcantarillado sanitario, con excepción de su extremo noreste. El crecimiento que ocurrió en esta zona básicamente consistió en ocupación de baldíos dispersos. Las áreas continuas de mayor crecimiento se ubicaron más allá del área cubierta por el alcantarillado, especialmente al sur y al este de San José. Probablemente estos desarrollos cuenten con su propio sistema de tratamiento, especialmente si son urbanizaciones nuevas, y el costo de la infraestructura fue asumido por el desarrollador. Sin embargo, son la forma principal de expansión de la ciudad porque no existen muchos espacios libres (no construidos) en el centro.

Un comentario similar puede aplicarse a la relación entre el área que ocupa San José y el límite de crecimiento, con la diferencia de que la ser este último más amplio que la cobertura del alcantarillado sanitario, sí quedan espacios desocupados. En particular, existen áreas desarrollables alrededor de la ruta nacional 27—en los municipios de Escazú, Santa Ana y Mora. De ahí que mucho del desarrollo de San José fuera expansión en los bordes de Escazú y, más recientemente, a lo largo de la ruta nacional 27. Esta expansión también obedece al diferencial de accesibilidad que representa la proximidad a la ruta nacional 27.

Las otras ciudades de la región, en cambio, sí tienen amplio espacio para expandirse dentro del límite de crecimiento. Sin embargo, debe resaltarse que las áreas desarrollables restantes están en las zonas menos accesibles en tanto que las áreas consolidadas de Heredia y Alajuela ya han llegado al límite de crecimiento por el norte. Cartago, que se expandió más lentamente hasta por lo menos 2010, tiene aún algunos espacios pero también está cerca de su borde norte. Tanto el centro de Alajuela como el de Heredia se ubican al norte de las rutas nacionales 1 y 3—que comunican San José con la costa del Pacífico. Las áreas libres de Alajuela están sobre todo al sur, lo cual contribuiría a explicar por qué no se han desarrollado. La accesibilidad adicional que les brinda la finalización de la ruta nacional 27 (completada en 2009) puede promover, a corto plazo, su desarrollo.

La figura 8 muestra la diferencia de la distancia promedio, por cantón, de nuevos desarrollos urbanos a carreteras nacionales, entre el desarrollo que ocurrió durante el primer periodo (1986–1997) y el segundo (1997–2010). En general, se muestran tres grupos de cantones. Primero, aquellos en que los nuevos desarrollos están más cerca del sistema de vías regional (diferencia negativa), que son tres casos muy particulares: San José (101), Barva (402) y San Isidro (406). Luego, existe un amplio grupo de cantones cuya diferencia no es estadísticamente significativa (el valor de 0 está dentro del intervalo de confianza a un 95 por ciento). Estos incluyen esencialmente los cantones de la ciudad de San José, excepto algunos de su periferia—Santa Ana (109); Coronado (111); Curridabat (118) y Goicoechea (108)—así como los cantones rurales de Alajuela. El tercer grupo incluye el cantón de Alajuela (201), los mencionados cantones de la periferia de San José y los cantones de las ciudades de Cartago y Heredia (con excepción, en este último caso, de Barva (402) y San Isidro (406)).

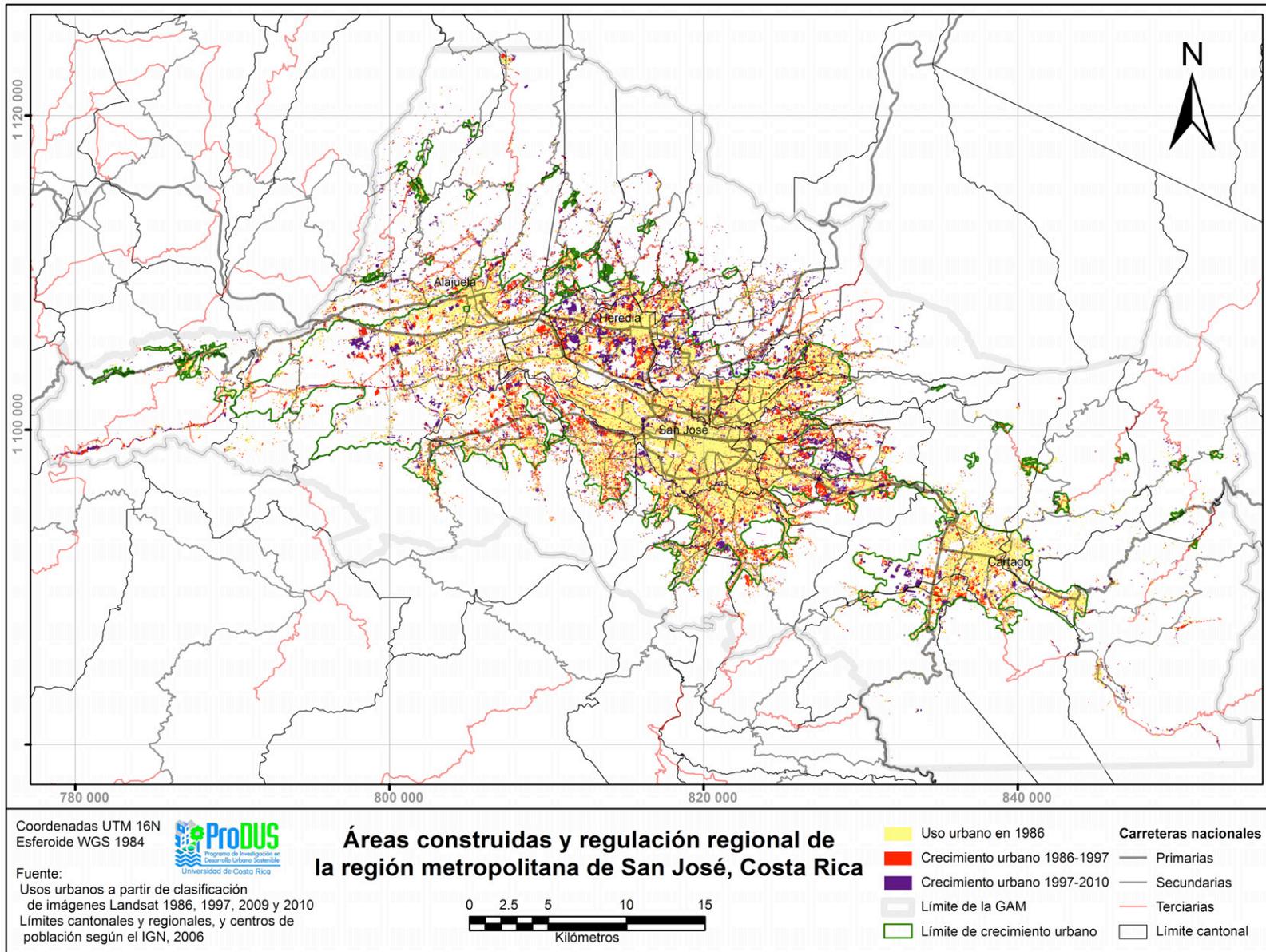
Aproximadamente, puede señalarse que los cantones del primer grupo incluyen dos comportamientos. Para San José, el desarrollo es más cercano a la vialidad regional porque lo que se ocupan son terrenos baldíos que han sido sujeto de especulación. El área ocupada es relativamente poca, pues paralelamente a esta consolidación del área construida, ha iniciado un proceso de intensificación de uso del suelo con la promoción y construcción de edificaciones relativamente altas (más de diez pisos) en zonas subutilizadas del casco central.

El desarrollo urbano de Barva, especialmente el más reciente, se ha concentrado al sur de su núcleo de población (entre este y el centro de Heredia) o hacia el oeste, lo cual incluye localizaciones más cercanas al sistema de vías primarias—y al centro de Heredia. En el caso de San Isidro, el desarrollo se ha concentrado alrededor de la ruta nacional 32, que se completó a finales de la década de 1980 y que ha cambiado radicalmente la accesibilidad del cantón al centro de San José.

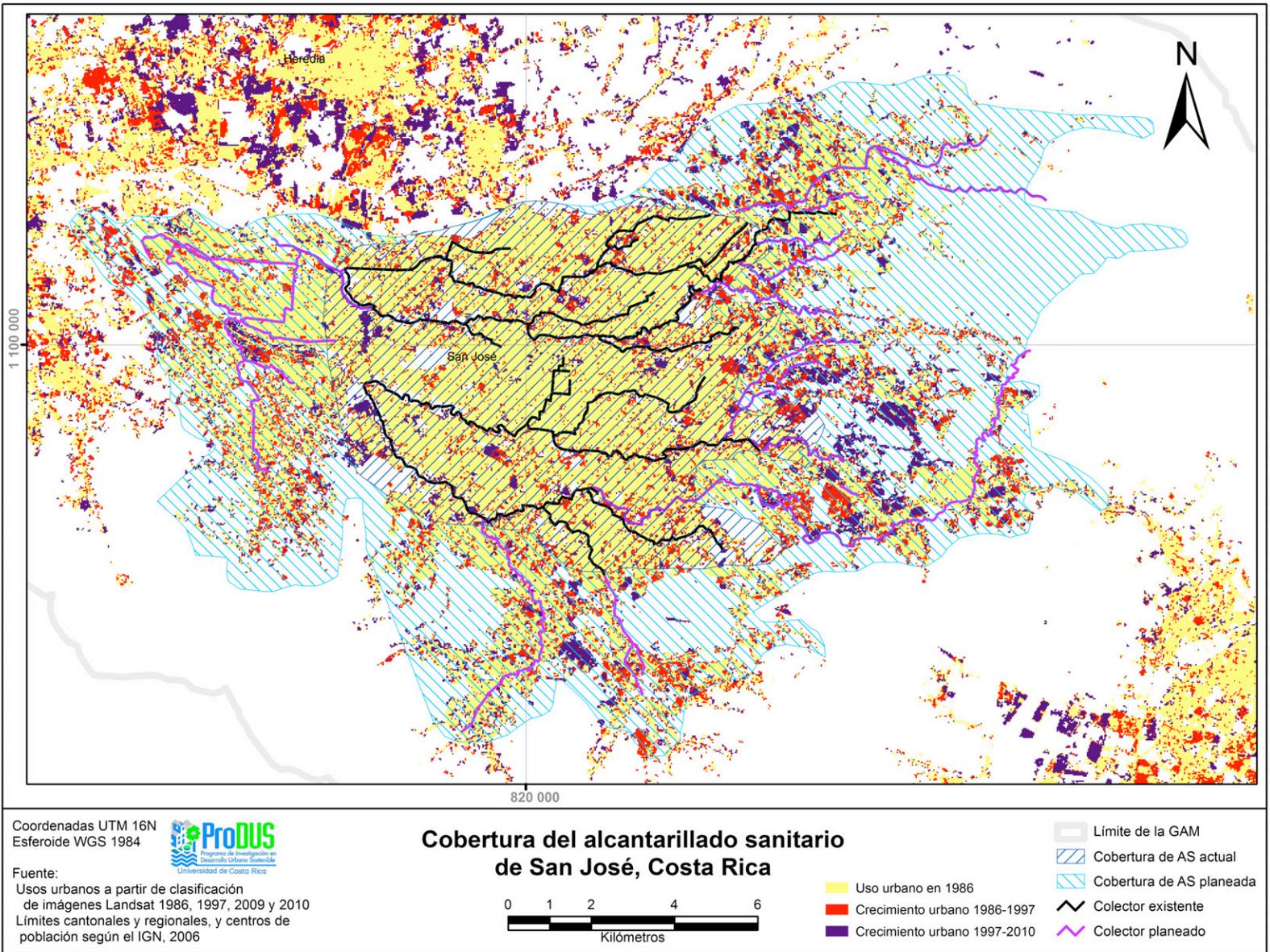
En general, los cantones cuyo crecimiento ocurre a aproximadamente la misma distancia del sistema de vías regional en ambos periodos (grupos para los cuales el valor de 0 está dentro del rango definido por un 95 por ciento de nivel de confianza) son cantones que fueron el borde de la ciudad de San José. Eventualmente, este crecimiento de borde dio paso a una combinación de expansión en áreas libres periféricas y consolidación de terrenos baldíos, fruto del primer proceso de expansión. De ellos, solo Poás tiene un comportamiento diferente, dado que tiene un muy alto nivel de dispersión de la distancia al sistema de vías primarias, sugiriendo relativamente poco crecimiento en localizaciones muy distintas.

El tercer grupo es característico de expansión en la periferia y transformación rápida de áreas rurales en urbanas. Es notable que se concentre en cantones fuera de San José, lo cual en conjunto con la limitada área desarrollable existente en San José, podría anticipar movimientos migratorios de San José hacia otras ciudades. En particular, los patrones de crecimiento y la información censal reciente (2011) sugieren que la ciudad de Heredia está atrayendo nuevos residentes, de la clase media de San José.

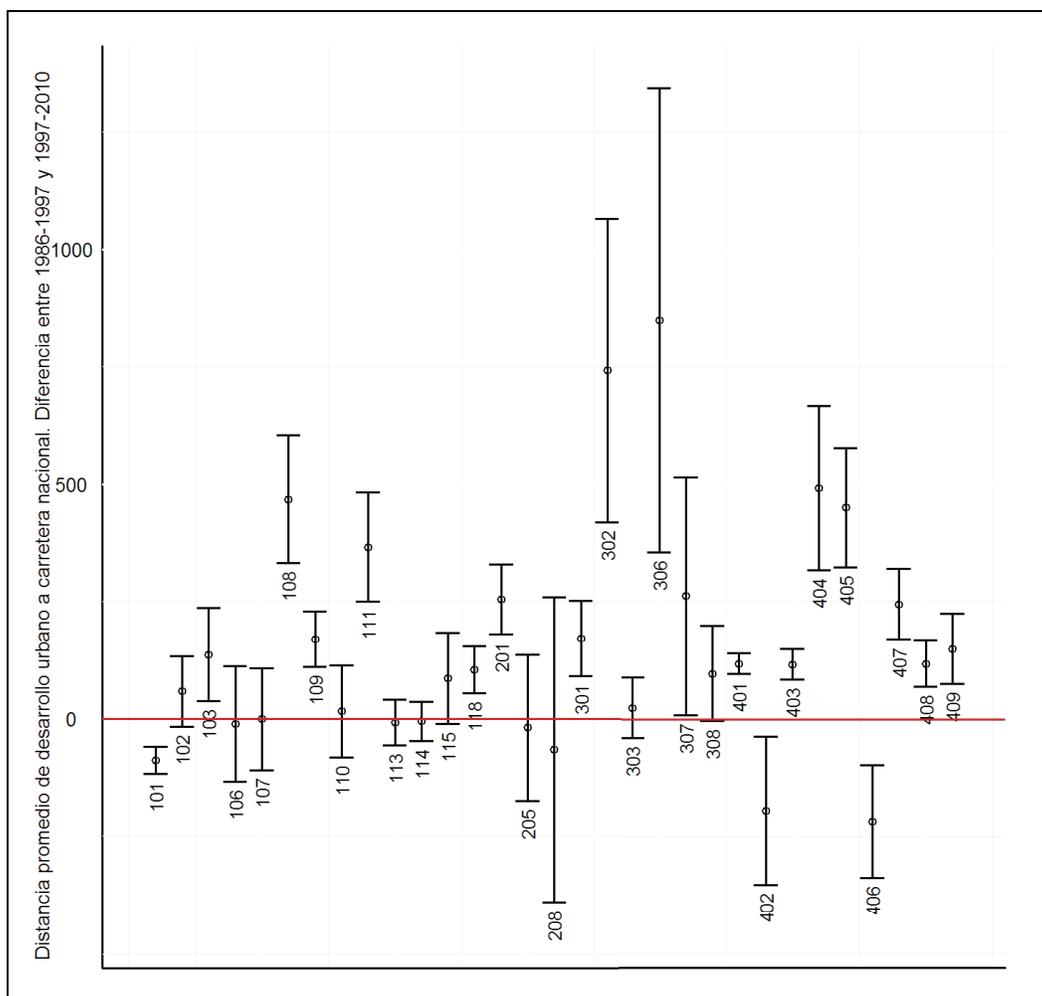
## Cobertura del alcantarillado sanitario de San José, Costa Rica



## Área construida y regulación de la región metropolitana de San José, Costa Rica



**Figura 8. Diferencia de distancia promedio a carreteras nacionales de nuevas áreas construidas entre el crecimiento de 1986–1997 y el crecimiento de 1997–2010 [con intervalos de confianza al 95 por ciento]**



### **Economías de aglomeración y transporte público**

Los patrones de desarrollo urbano de una ciudad están profundamente ligados a la tecnología de transporte dominante en el periodo histórico de su desarrollo (véase entre otros Newman & Kenworthy, 1999). El crecimiento urbano disperso actualmente dominante en muchas ciudades del mundo no es la excepción.

Glaeser y Kahn (2004) han argumentado que el crecimiento urbano disperso es consecuencia, esencialmente, del uso masivo del automóvil particular. En efecto, si se postula una ciudad monocéntrica (bajo el modelo clásico de Alonso-Mills-Muth), menores costos de transporte implican una ciudad que se expande en sus bordes y cuya densidad se reduce, vía mayor consumo de área por hogar. En un contexto de ciudad policéntrica, el cambio de transporte público a vehículos privados como medio principal de transporte de la fuerza de trabajo, reduce los costos de crear nuevos subcentros. Esto a su vez promueve mayor descentralización (véase

Glaeser & Kahn, 2004). Si los costos de transporte son lo suficientemente bajos, Tabuchi (1998) ha demostrado que la descentralización ocurrirá incluso pese a las economías de aglomeración. Más aún, este proceso de descentralización reducirá el bienestar general.

En este sentido, la región metropolitana de San José puede considerarse como un caso muy particular. Los ingresos de la población han aumentado (el PIB costarricense creció 2.5 veces en términos reales durante las últimas dos décadas), lo cual promovió una mayor preferencia por áreas grandes y una mayor adquisición y uso de vehículos privados (véase Ingram y Liu, 1998, para estimaciones sobre la relación entre ingresos y motorización). Sería de esperar, entonces, una mayor dispersión en los nuevos desarrollos urbanos. Sin embargo, las densidades poblacionales han aumentado y las zonas urbanas se han vuelto más compactas.

Tres posibles condiciones pueden contribuir a explicar este resultado, aunque la respuesta definitiva requerirá de esfuerzos de investigación adicionales. En primer término, como se ha discutido, la región metropolitana de San José es estructuralmente dispersa: las ciudades actuales son el producto de una conurbación de muchas pequeñas poblaciones rurales, las más grandes de las cuales (San José, Alajuela, Heredia y Cartago) se convirtieron en centros urbanos. La conurbación se produjo mediante la urbanización de tierras rurales entre estas poblaciones, proceso que fue facilitado por redes de servicios públicos y caminos que comunicaban estos pueblos entre sí, brindando acceso relativamente fácil a servicios esenciales. Esta dinámica se ve reflejada en los índices estimados como un aumento en la compacidad.

Por otra parte, existe alguna evidencia (véase Pérez et al., 2011) de que los valores del suelo han aumentado más rápidamente que los niveles de ingreso. Esto, a su vez, sugiere que el ingreso adicional disponible por menores costos de transporte no alcanza para compensar el aumento de precio por mayor área de una vivienda. De hecho, es posible detectar algunas tendencias incipientes hacia densificación mediante reducción en el área por vivienda y en la cantidad de pisos de nuevas viviendas individuales. Se ha comentado, además, que la renta del suelo rural interioriza ya un componente especulativo, de su potencial urbanización. Esto también promueve mayores densidades y menor consumo de área por hogar.

Finalmente, debe señalarse el impacto de la congestión vial. Si bien es cierto los ingresos han resultado en más vehículos circulando por las vías, el sistema regional de carreteras no ha sido expandido en igual proporción. Esto significa que muchos de los ahorros de tiempo (costo de transporte) del cambio de modo hacia vehículos privados se pierden con relativa rapidez. Más aún, una misma localización que podía ser considerada accesible hace una década puede hoy ser relativamente poco accesible por el aumento en el tiempo de viaje hacia ella desde el centro de la ciudad (o en general, desde otras áreas de la región metropolitana).

### **Monocentralidad vs. Policentralidad**

La región metropolitana de San José ha sido caracterizada como policéntrica por formación. Originalmente, estaba compuesta por cuatro poblaciones principales y una serie de poblados más pequeños. Estos se han venido conurbando, lo cual ha resultado en una región con cuatro ciudades. Las deficiencias del sistema de transportes, a su vez producto de limitaciones asociadas a la existencia de barreras físicas en la ciudad (ríos con cañones profundos, zonas montañosas),

han impedido la conformación de una única gran ciudad, aunque el predominio de San José es claramente evidente. Las cifras más recientes del censo de 2011 permiten cuantificar esta realidad. La ciudad de San José incluye el 56 por ciento de los habitantes de la región, Heredia un 16 por ciento, y Cartago y Alajuela un 14 por ciento cada una (la población total censada fue de 2,27 millones de habitantes, 681 mil viviendas).

En síntesis, la ciudad se comporta monocéntricamente para algunas funciones, donde el centro puede ser San José, el centro de la ciudad correspondiente o el núcleo original de población. Pero también exhibe tendencias policéntricas—notablemente, la localización de centros de oficinas e industria cerca del sistema regional de autopistas. La monocentralidad constituye la realidad de los usuarios de transporte público, y es más un problema de niveles (si el centro para una actividad particular es San José, la ciudad o el municipio) que de estructura, porque el sistema vial es de tales características que las vías convergen hacia las centralidades tradicionales. El habitante urbano decide dónde detenerse: si en el centro municipal, si continúa hacia la ciudad o si en la ciudad hace un transbordo para continuar a San José.

Bajo esta concepción del funcionamiento de diversos agentes urbanos—que es aplicable a la mayoría de la población y de las actividades urbanas, pero no a toda<sup>20</sup>—se introdujeron en los distintos modelos econométricos variables que estiman distancias a centros de ciudad y al centro de San José. Vale notar que los datos modelados fueron de sección transversal municipal; futuros modelos espacial-estadísticos requerirán posiblemente de la distancia al centro municipal también. Debe subrayarse que, en general, los niveles de correlación entre las distancias mencionadas fueron muy altos, en gran medida porque 13 de 31 municipios (de la ciudad de San José) presentan la misma distancia al centro de ciudad y al centro de San José. Más aún, las distancias al centro de San José tendieron a ser más significativas que otras medidas de localización, posiblemente porque existan diferenciales de forma urbana entre las distintas ciudades que estén siendo parcialmente capturados por la variable de distancia a San José.

## Conclusiones

La generación de mapas de uso del suelo urbano y su análisis, en términos de índices comparables de dispersión urbana, han permitido caracterizar parcialmente el desarrollo urbano regional a través de su área construida en el contexto histórico propio de la región y en el contexto latinoamericano y mundial.

A partir de comparaciones con los resultados de Burchfield et al. (2006) y de Angel et al. (2005, 2010a, 2010b, 2010c), es posible afirmar que la región metropolitana de San José es menos densa y más dispersa que la mayoría de ciudades latinoamericanas, aunque no llega a los niveles de Estados Unidos. La diferencia fundamental está en el proceso de conformación de la región como sistema urbano. El *sprawl*, en su formulación clásica (Glaeser & Kahn, 2004), es un proceso consecuencia de menores costos de transporte. La dispersión del área construida de la

---

<sup>20</sup> Dos excepciones notables son: los ya señalados empleados de centros de negocios e industrias de alta tecnología, que acceden a sus trabajos a través de autopistas, y los estudiantes de primaria. Las escuelas costarricenses son aún hoy un servicio básicamente local; la abrumadora mayoría de estudiantes de primaria va de sus casas a la escuela a pie.

región metropolitana de San José, en cambio, es consecuencia de una estructura originalmente dispersa que se ha venido consolidando conforme se construyeron los espacios más cercanos a los núcleos de población existentes. Las limitaciones del sistema vial, sumado a una población creciente, han creado incentivos para que el crecimiento haya sido más orgánico que disperso (en el sentido de *leapfrogging*).

Los indicadores que caracterizan los patrones del área construida reflejan aumentos en los niveles de compacidad y reducciones en la dispersión, que son consecuencia del crecimiento demográfico regional: al aumentar la población, se ocupa un área construida mayor para albergarla. La población crece ligeramente más rápido que el área construida, lo cual a su vez implica un aumento de la densidad; esto es producto probablemente de las limitaciones del sistema de vial, que generan mayores costos de transporte por congestión. Nótese, sin embargo, que las localizaciones que se construyen (el área de nueva construcción) se caracterizan por niveles de dispersión constantes tanto para 1986–1997 como para 1997–2010. La consolidación ocurre porque el crecimiento durante estos dos periodos ocurrió a en zonas con valores menores de dispersión que el valor de dispersión del conjunto del área construida; pero este ya no es el caso para 2010. De modo que si se mantienen los niveles de dispersión del crecimiento, debería revertirse la tendencia hacia mayor compacidad del área construida total.

Los determinantes del desarrollo urbano tienden a ser, en general, consistentes con el modelo de ciudad monocéntrica de Alonso-Mills-Muth, y con resultados anteriores de análisis macro. Cuanto más lejano del centro de San José, más disperso el desarrollo y menor la cantidad de área construida. Igualmente, el crecimiento que ocurre en los municipios alejados de San José es de mayor magnitud, rapidez y grado de dispersión. Las asociaciones detectadas, si bien se han estimado a una escala espacial relativamente gruesa, sugieren la existencia de procesos teóricamente derivados en modelos microeconómicos de localización de actividades, excepto con relación al impacto de la regulación regional. Modelos causales más espacialmente detallados (por ejemplo Pérez y Pujol, 2012) sí han detectado impactos significativos que no fue posible capturar con los modelos generales estimados. La extensión de los resultados a escalas más detalladas permitirá una descripción de los mecanismos causales y la cuantificación del impacto de estos mecanismos. En particular, es de gran interés extender las evaluaciones de los instrumentos regulatorios (el límite de crecimiento) y de las variaciones en el tiempo de costos de transporte.

Finalmente, es necesario subrayar dos aspectos muy relevantes sobre el mercado de suelos y los patrones de urbanización en su contexto. Los desarrollos dispersos (tipo *sprawl*) deberían producir una externalidad ambiental negativa muy grande, especialmente al norte de Heredia y Alajuela, por su potencial impacto sobre los mantos acuíferos que allí se ubican. El crecimiento orgánico del área construida permite recoger las aguas servidas y tratarlas en una planta; el crecimiento disperso implica tratamientos mediante fosas sépticas, que permiten la infiltración de agua parcialmente contaminada. Una contaminación significativa de estos acuíferos puede restringir el acceso al agua potable que consume más de la mitad de la población regional. Este impacto *no está incorporado en los valores del suelo de la periferia*. En cambio, sí existe alguna evidencia de que el valor estético de los parajes rurales de la región si ha sido interiorizado en los precios del suelo; véase Pujol & Pérez, (2012). Segundo, el análisis comparado de rentas agrícolas y valores del suelo sugiere que en las zonas de crecimiento urbano más intenso, el

mecanismo que controla la ocupación del suelo por nuevas actividades urbanas (construcción) no es la diferencia de renta entre usos urbanos y no urbanos, como argumentan Irwin y Geoghegan (2008)<sup>21</sup>. Debe analizarse con mayor detalle el impacto de ingresos crecientes y patrones de crecimiento del área construida sobre la expectativa de valorización de las propiedades rurales, así como el impacto diferenciado de los costos de transporte que pueden estar restringiendo incipientemente el desarrollo de la periferia en favor de la densificación en altura del centro de San José.

---

<sup>21</sup> Con excepción del Área Metropolitana de Cartago, donde los precios del suelo son más bajos – por ser un área menos accesible – y los cultivos que se producen (papa y cebolla) son más rentables.

## Referencias

- Angel, S., Parent, J., Civco, D.L. & Blei, A.M. (2010a). *The Persistent Decline in Urban Densities: Global and Historical Evidence of Sprawl* (WP10SA1). Cambridge, MA: Lincoln Institute of Land Policy.
- Angel, S., Parent, J. & Civco, J.L. (2010b). *The Fragmentation of Urban Footprints: Global Evidence of Sprawl, 1990–2000* (WP10SA2). Cambridge, MA: Lincoln Institute of Land Policy.
- Angel, S., Parent, J., Civco, D.L., Blei, A. & Potere, D. (2010c). *A Planet of Cities: Urban Land Cover Estimates and Projections for All Countries, 2000–2050* (WP10SA3). Cambridge, MA: Lincoln Institute of Land Policy.
- Angel, S., Sheppard, S.C. & Civco, D.L. (con Buckley, R., Chabaeva, A., Gitlin, L. *et al.*) (2005). *The Dynamics of Global Urban Expansion*. Washington DC: Department of Transportation and Urban Development, The World Bank.
- Besussi, E., Chin, N., Batty, M. & Longley, P. (2010). The Structure and Form of Urban Settlements. En T. Rashed y C. Jürgens (Eds.) *Remote Sensing of Urban and Suburban Areas*. Heidelberg, Alemania: Springer.
- Brueckner, J.K. (1987). The structure of urban equilibria: a unified treatment of the Muth-Mills model. En E.S. Mills (Ed.) *Handbook of Urban and Regional Economics, Volume 2*. Amsterdam: Elsevier.
- Burchfield, M., Overman, H.G., Puga D., & Turner, M.A. (2006). Causes of sprawl: A portrait from space. *Quarterly Journal of Economics*, 121(2), 587–633.
- Cohen, B. (2003). Urban Growth in Developing Countries: A Review of Current Trends and a Caution Regarding Existing Forecasts. *World Development*, 32(1), 23–51.
- Deng, X., Huang, J., Rozelle, S. & Uchida, E. (2008). Growth, population and industrialization, and urban land expansion in China. *Journal of Urban Economics*, 63(1), 96–115.
- Galster, G., Hanson, R., Rathcliffe, M.R., Wolman, H., Coleman, S. & Freihage, J. (2001). Wrestling Sprawl to the Ground: Defining and Measuring an Elusive Concept. *Housing Policy Debate*, 12(4), 681–717.
- Glaeser, E.L. (2008). *Cities, Agglomeration and Spatial Equilibrium*. Oxford, Inglaterra: Oxford University Press.
- Glaeser, E.L. & Kahn, M.E. (2004). Sprawl and Urban Growth. En J.V. Henderson y J.F. Thisse (Eds.) *Handbook of Urban and Regional Economics, Volume 4*. Amsterdam: Elsevier.
- González, A. (1994). *Estudio del uso del suelo en el Gran Área Metropolitana: con énfasis en el centro de San José*. Tesis de Licenciatura sin publicar, Universidad de Costa Rica, San José
- Goward, S.N., Masek, J.G., Williams, D.L., Irons, J.R. & Thompson, R.J. (2001). The Landsat 7 mission. Terrestrial research and applications for the 21st century. *Remote Sensing of Environment*, 78(1–2), 3–12.
- Gudmunson, L. (2010). *Costa Rica antes del café* (2nda ed.) San José, Costa Rica: EUNED

- Hall, C. (1976). *El Café y el desarrollo histórico-geográfico de Costa Rica*. San José, Costa Rica: Editorial Costa Rica y Universidad Nacional.
- Hsiao, C. (2003). *Analysis of Panel Data* (2nda ed.). Cambridge, Inglaterra: Cambridge University Press.
- Ingram, G.K. y Liu, Z. (1999). *Determinants of Motorization and Road Provision*. Research working paper. Washington D.C.: el Banco Mundial.
- INVU (1983). *Plan regional metropolitano GAM*. San José: el Instituto.
- Irwin, E.G. & Bockstael, N.E. (2008). The evolution of urban sprawl: Evidence of spatial heterogeneity and increasing land fragmentation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(52), 20672–20677.
- Irwin, E.G., Bockstael, N.E. & Cho, H.J. (2006). Measuring and modeling urban sprawl: Data, scale and spatial dependencies. En R. Arnott (Moderador), *Urban Economics Sessions*. 53rd Annual North American Regional Science Association Meetings of the Regional Science Association International, Toronto, Canadá.
- Irwin, E.G. & Geoghegan, J. (2001). Theory, data, methods: developing spatially explicit economic models of land use change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 85(1), 7–23
- Lillesand, T.M. & Kiefer, R.W. (1994). *Remote sensing and image interpretation* (3era ed.). Nueva York: John Wiley & Sons.
- Newman, P.G. & Kenworthy, J. (1999). *Sustainability and Cities: Overcoming Automobile Dependence*. Washington D.C.: Island Press.
- Pérez, E., Pujol, R., Sánchez, L. & Zamora, L. (2011). *Restricciones a la urbanización y valores del suelo en la Gran Área Metropolitana. El caso del Norte de Heredia* (Proyecto A9604). San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible y Vicerrectoría de Investigación.
- Pujol, R. (1988). *Policy Instruments for Spatial Development of the San Jose Greater Metropolitan Area: Regulation, Taxation and Infrastructure Investment*. Tesis de Maestría sin publicar, Universidad de California-Berkeley, Berkeley.
- Pujol, R. (2005). Sistemas de transporte en la región metropolitana de San José. En Y. Bussière (Ed.), *Transporte urbano en Latinoamérica y el Caribe: Estudios de casos* (San José, Puebla, Puerto España, Puerto Príncipe). San José, Costa Rica: FLACSO-Costa Rica.
- Pujol, R., Pérez, E. & Sánchez, L. (2009). *Hacia un cambio en la oferta de vivienda en la GAM: una exploración desde los grandes desafíos planteados por la demanda potencial de vivienda de la región*. Ponencia preparada para el Decimoquinto Informe Estado de la Nación. San José: Programa Estado de la Nación y Universidad de Costa Rica, Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible.
- Pujol, R., Sánchez, L. & Pérez, E. (2011). La segregación social como determinante del desarrollo urbano. Barrios cerrados y autosegregación en las ciudades de San José y Heredia, Costa Rica. *Revista de Ciencias Económicas*, 29(1), 445–477.

- Pujol, R. & Pérez, E. (2012). *Assessing the impact of urban growth boundaries on the land market. A case study in Heredia, San José, Costa Rica*. Documento de trabajo. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, ProDUS.
- R Development Core Team (2011). *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.
- Reynolds, J. (1996). Las aguas subterráneas de Costa Rica: un recurso en peligro. En J. Reynolds (Ed.), *Utilización y manejo sostenible de los recursos hídricos*. San José, Costa Rica: Editorial Fundación UNA.
- Rodríguez-Clare, A., Sáenz, M. & Trejos, A. (2003). *Análisis del crecimiento económico en Costa Rica* (Serie de Estudios Económicos y Sociales RE2-03-001). Washington, DC: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Román, M. (2008). *Análisis del mercado inmobiliario-hipotecario de Costa Rica. Parte I* (Serie Investigación y Análisis 5). San José: Programa de Regularización del Catastro y Registro.
- Schneider, A. & Woodcock, C.E. (2008). Compact, Dispersed, Fragmented, Extensive? A comparison of Urban Growth in Twenty-five Global Cities using Remotely Sensed Data, Pattern Metrics and Census Information. *Urban Studies*, 45(3), 659–692.
- Seto, K.C., Woodcock, C.E., Song, C., Huang, X., Lu, J. & Kaufmann, R.K. (2002). Monitoring land-use change in the Pearl River Delta using Landsat TM. *International Journal of Remote Sensing*, 23(10), 1985–2004.
- Tabuchi, T. 1998. Urban Agglomeration and Dispersion: A Synthesis of Alonso and Krugman. *Journal of Urban Economics*, 44(3), 333–351.
- Williamson, R.A. (1997). The Landsat Legacy: Remote Sensing Policy and the Development of Commercial Remote Sensing. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 63(7), 877–885.

## Apéndice

### Cuadro A.1. Resumen de indicadores de área construida por municipio

| Cantón            | Área total | Área edificable | Área edificable libre |             | Área construida |             | Densidad        | Índices    |            |             |
|-------------------|------------|-----------------|-----------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|------------|------------|-------------|
|                   | ha         | ha              | ha                    | % del total | ha              | % del total | hab./ ha urbana | Dispersión | Compacidad | Contigüidad |
| <b>1986</b>       |            |                 |                       |             |                 |             |                 |            |            |             |
| 101 San José      | 4481.7     | 4234.6          | 1082.8                | 25.57%      | 3226.7          | 70.33%      | 82.77           | 0.2551     | 0.7620     | 0.9637      |
| 102 Escazú        | 3462.5     | 2398.7          | 1582.9                | 65.99%      | 846.1           | 23.56%      | 44.45           | 0.5563     | 0.3527     | 0.3695      |
| 103 Desamparados  | 5972.5     | 3711.3          | 2517.0                | 67.82%      | 1225.3          | 20.00%      | 96.10           | 0.4830     | 0.3301     | 0.5841      |
| 106 Aserri        | 2955.0     | 1215.6          | 960.7                 | 79.03%      | 267.7           | 8.63%       | 93.95           | 0.6062     | 0.2202     | 0.6543      |
| 107 Mora          | 6329.1     | 2935.0          | 2771.7                | 94.44%      | 178.6           | 2.58%       | 47.68           | 0.7543     | 0.0608     | 0.2422      |
| 108 Gocioechea    | 3173.1     | 2344.8          | 1510.8                | 64.43%      | 845.7           | 26.28%      | 107.25          | 0.3705     | 0.3607     | 0.6492      |
| 109 Santa Ana     | 6145.4     | 3395.3          | 2612.5                | 76.95%      | 837.7           | 12.74%      | 26.86           | 0.7050     | 0.2467     | 0.1120      |
| 110 Alajuelita    | 2151.4     | 1189.2          | 804.1                 | 67.62%      | 398.9           | 17.90%      | 91.33           | 0.5130     | 0.3354     | 0.6877      |
| 111 Coronado      | 5206.5     | 3835.0          | 3416.0                | 89.08%      | 422.6           | 8.05%       | 68.60           | 0.5415     | 0.1102     | 0.6705      |
| 113 Tibás         | 835.9      | 766.3           | 209.7                 | 27.37%      | 562.3           | 66.58%      | 120.15          | 0.2952     | 0.7339     | 0.9850      |
| 114 Moravia       | 2917.4     | 2453.2          | 1959.7                | 79.88%      | 499.5           | 16.92%      | 76.64           | 0.4259     | 0.2036     | 0.6165      |
| 115 Montes de Oca | 1557.5     | 1421.9          | 877.4                 | 61.71%      | 550.7           | 34.96%      | 78.76           | 0.3810     | 0.3873     | 0.8671      |
| 118 Curridabat    | 1623.1     | 1545.2          | 899.1                 | 58.19%      | 658.8           | 39.81%      | 58.46           | 0.4610     | 0.4263     | 0.6519      |
| 201 Alajuela      | 26146.4    | 22194.9         | 19084.8               | 85.99%      | 3176.3          | 11.90%      | 45.42           | 0.6541     | 0.1431     | 0.3417      |
| 205 Atenas        | 8391.8     | 4709.0          | 4427.9                | 94.03%      | 308.3           | 3.35%       | 38.74           | 0.8206     | 0.0655     | 0.2219      |
| 208 Poás          | 6646.7     | 5300.8          | 5091.0                | 96.04%      | 221.9           | 3.16%       | 72.23           | 0.8443     | 0.0419     | 0.1833      |
| 301 Cartago       | 19008.5    | 11203.4         | 9634.7                | 86.00%      | 1613.2          | 8.25%       | 56.68           | 0.5125     | 0.1440     | 0.4619      |
| 302 Paraíso       | 16960.1    | 8478.9          | 8057.6                | 95.03%      | 429.8           | 2.48%       | 74.08           | 0.6598     | 0.0507     | 0.3251      |
| 303 La Unión      | 4454.4     | 3373.5          | 2791.7                | 82.75%      | 617.0           | 13.06%      | 79.03           | 0.6717     | 0.1829     | 0.4297      |
| 306 Alvarado      | 7980.1     | 4332.0          | 4241.8                | 97.92%      | 98.4            | 1.13%       | 94.36           | 0.8991     | 0.0227     | 0.1737      |
| 307 Oreamuno      | 7177.1     | 5573.8          | 5165.3                | 92.67%      | 415.2           | 5.69%       | 66.47           | 0.5959     | 0.0745     | 0.4792      |
| 308 El Guarco     | 8396.2     | 3823.1          | 3439.5                | 89.97%      | 395.3           | 4.57%       | 59.28           | 0.6565     | 0.1034     | 0.4419      |
| 401 Heredia       | 2523.4     | 2473.1          | 1516.8                | 61.33%      | 962.9           | 37.90%      | 66.79           | 0.4878     | 0.3894     | 0.3949      |

| Cantón            | Área total      | Área edificable | Área edificable libre |               | Área construida |               | Densidad        | Índices       |               |               |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|
|                   | ha              | ha              | ha                    | % del total   | ha              | % del total   | hab./ ha urbana | Dispersión    | Compacidad    | Contigüidad   |
| 402 Barva         | 5613.7          | 4719.2          | 4471.8                | 94.76%        | 248.5           | 4.41%         | 88.08           | 0.7411        | 0.0527        | 0.1987        |
| 403 Santo Domingo | 2527.1          | 2274.0          | 1872.5                | 82.34%        | 412.1           | 15.89%        | 66.25           | 0.6799        | 0.1812        | 0.3856        |
| 404 Santa Bárbara | 5216.0          | 3817.5          | 3577.0                | 93.70%        | 246.2           | 4.61%         | 78.81           | 0.7978        | 0.0645        | 0.1963        |
| 405 San Rafael    | 4812.7          | 4003.7          | 3732.4                | 93.22%        | 271.9           | 5.64%         | 97.03           | 0.6157        | 0.0679        | 0.6332        |
| 406 San Isidro    | 2652.8          | 2202.1          | 2025.2                | 91.97%        | 177.6           | 6.67%         | 55.56           | 0.8176        | 0.0806        | 0.1550        |
| 407 Belén         | 1248.2          | 1184.7          | 705.8                 | 59.58%        | 496.1           | 38.37%        | 27.73           | 0.5603        | 0.4187        | 0.2838        |
| 408 Flores        | 674.6           | 669.5           | 482.4                 | 72.05%        | 187.2           | 27.74%        | 55.52           | 0.6410        | 0.2796        | 0.4265        |
| 409 San Pablo     | 834.8           | 832.3           | 644.3                 | 77.41%        | 188.3           | 22.52%        | 73.89           | 0.6454        | 0.2262        | 0.6684        |
| <i>GAM</i>        | <i>178075.4</i> | <i>122611.5</i> | <i>102166.8</i>       | <i>83.33%</i> | <i>20986.5</i>  | <i>11.48%</i> | <i>68.34</i>    | <i>0.5248</i> | <i>0.1712</i> | <i>0.3153</i> |
| <b>1997</b>       |                 |                 |                       |               |                 |               |                 |               |               |               |
| 101 San José      | 4481.7          | 4234.6          | 689.9                 | 16.29%        | 3632.6          | 79.09%        | 84.43           | 0.1704        | 0.8578        | 0.9850        |
| 102 Escazú        | 3462.5          | 2398.7          | 1213.2                | 50.58%        | 1232.5          | 34.24%        | 40.71           | 0.4073        | 0.5138        | 0.7990        |
| 103 Desamparados  | 5972.5          | 3711.3          | 2095.7                | 56.47%        | 1668.8          | 27.05%        | 101.41          | 0.3524        | 0.4496        | 0.8896        |
| 106 Aserri        | 2955.0          | 1215.6          | 902.4                 | 74.24%        | 332.7           | 10.60%        | 103.51          | 0.5378        | 0.2737        | 0.8737        |
| 107 Mora          | 6329.1          | 2935.0          | 2692.5                | 91.74%        | 265.9           | 3.83%         | 47.59           | 0.6561        | 0.0906        | 0.4240        |
| 108 Gocioechea    | 3173.1          | 2344.8          | 1346.1                | 57.41%        | 1015.3          | 31.47%        | 113.31          | 0.2720        | 0.4330        | 0.9420        |
| 109 Santa Ana     | 6145.4          | 3395.3          | 2249.1                | 66.24%        | 1221.8          | 18.65%        | 26.34           | 0.5927        | 0.3599        | 0.4306        |
| 110 Alajuelita    | 2151.4          | 1189.2          | 714.2                 | 60.05%        | 494.3           | 22.08%        | 122.68          | 0.4157        | 0.4157        | 0.7422        |
| 111 Coronado      | 5206.5          | 3835.0          | 3284.3                | 85.64%        | 556.2           | 10.58%        | 88.96           | 0.4166        | 0.1450        | 0.7451        |
| 113 Tibás         | 835.9           | 766.3           | 123.5                 | 16.11%        | 649.6           | 76.89%        | 120.70          | 0.1974        | 0.8478        | 0.9914        |
| 114 Moravia       | 2917.4          | 2453.2          | 1836.7                | 74.87%        | 626.0           | 21.13%        | 79.74           | 0.3417        | 0.2552        | 0.7965        |
| 115 Montes de Oca | 1557.5          | 1421.9          | 713.9                 | 50.21%        | 716.5           | 45.46%        | 69.92           | 0.2530        | 0.5039        | 0.9501        |
| 118 Curridabat    | 1623.1          | 1545.2          | 654.8                 | 42.37%        | 910.7           | 54.86%        | 64.53           | 0.3442        | 0.5894        | 0.9336        |
| 201 Alajuela      | 26146.4         | 22194.9         | 18162.0               | 81.83%        | 4125.1          | 15.42%        | 49.95           | 0.6027        | 0.1859        | 0.4585        |
| 205 Atenas        | 8391.8          | 4709.0          | 4327.8                | 91.91%        | 426.3           | 4.54%         | 36.98           | 0.7940        | 0.0905        | 0.2267        |
| 208 Poás          | 6646.7          | 5300.8          | 5029.8                | 94.89%        | 287.3           | 4.08%         | 80.65           | 0.8173        | 0.0542        | 0.1949        |
| 301 Cartago       | 19008.5         | 11203.4         | 9317.2                | 83.16%        | 1940.9          | 9.92%         | 60.99           | 0.4471        | 0.1732        | 0.5898        |
| 302 Paraíso       | 16960.1         | 8478.9          | 7959.1                | 93.87%        | 532.7           | 3.07%         | 90.19           | 0.6362        | 0.0628        | 0.5000        |

| Cantón            | Área total      | Área edificable | Área edificable libre |               | Área construida |               | Densidad        | Índices       |               |               |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|
|                   | ha              | ha              | ha                    | % del total   | ha              | % del total   | hab./ ha urbana | Dispersión    | Compacidad    | Contigüidad   |
| 303 La Unión      | 4454.4          | 3373.5          | 2513.5                | 74.51%        | 914.5           | 19.31%        | 82.15           | 0.5661        | 0.2711        | 0.6999        |
| 306 Alvarado      | 7980.1          | 4332.0          | 4230.4                | 97.65%        | 111.6           | 1.27%         | 106.48          | 0.8892        | 0.0258        | 0.1653        |
| 307 Oreamuno      | 7177.1          | 5573.8          | 5129.6                | 92.03%        | 452.4           | 6.19%         | 83.07           | 0.5603        | 0.0812        | 0.5036        |
| 308 El Guarco     | 8396.2          | 3823.1          | 3317.9                | 86.79%        | 523.7           | 6.02%         | 61.51           | 0.5363        | 0.1370        | 0.5128        |
| 401 Heredia       | 2523.4          | 2473.1          | 1167.3                | 47.20%        | 1313.4          | 51.75%        | 74.67           | 0.3726        | 0.5311        | 0.7358        |
| 402 Barva         | 5613.7          | 4719.2          | 4351.2                | 92.20%        | 369.3           | 6.56%         | 83.44           | 0.6634        | 0.0782        | 0.4400        |
| 403 Santo Domingo | 2527.1          | 2274.0          | 1705.1                | 74.98%        | 582.1           | 22.52%        | 59.03           | 0.6232        | 0.2560        | 0.4180        |
| 404 Santa Bárbara | 5216.0          | 3817.5          | 3455.0                | 90.50%        | 370.2           | 6.95%         | 75.21           | 0.7260        | 0.0970        | 0.2936        |
| 405 San Rafael    | 4812.7          | 4003.7          | 3618.5                | 90.38%        | 386.1           | 8.00%         | 93.19           | 0.5283        | 0.0964        | 0.6944        |
| 406 San Isidro    | 2652.8          | 2202.1          | 1972.6                | 89.58%        | 230.5           | 8.65%         | 64.29           | 0.7700        | 0.1047        | 0.2472        |
| 407 Belén         | 1248.2          | 1184.7          | 568.2                 | 47.96%        | 639.7           | 49.39%        | 29.53           | 0.4355        | 0.5400        | 0.8039        |
| 408 Flores        | 674.6           | 669.5           | 398.9                 | 59.58%        | 270.8           | 40.12%        | 53.33           | 0.5072        | 0.4045        | 0.9114        |
| 409 San Pablo     | 834.8           | 832.3           | 587.1                 | 70.53%        | 245.6           | 29.38%        | 81.93           | 0.5535        | 0.2951        | 0.8072        |
| <b>GAM</b>        | <b>178075.4</b> | <b>122611.5</b> | <b>96327.3</b>        | <b>78.56%</b> | <b>27044.9</b>  | <b>14.76%</b> | <b>71.41</b>    | <b>0.4457</b> | <b>0.2206</b> | <b>0.4216</b> |
| <b>2010</b>       |                 |                 |                       |               |                 |               |                 |               |               |               |
| 101 San José      | 4481.7          | 4234.6          | 480.2                 | 11.34%        | 3860.0          | 83.77%        | 90.45           | 0.1228        | 0.9115        | 0.9929        |
| 102 Escazú        | 3462.5          | 2398.7          | 1020.8                | 42.56%        | 1448.5          | 39.80%        | 42.01           | 0.3408        | 0.6039        | 0.8825        |
| 103 Desamparados  | 5972.5          | 3711.3          | 1868.4                | 50.34%        | 1911.0          | 30.86%        | 147.48          | 0.2927        | 0.5149        | 0.9257        |
| 106 Aserri        | 2955.0          | 1215.6          | 826.1                 | 67.96%        | 417.2           | 13.18%        | 93.11           | 0.4614        | 0.3432        | 0.9012        |
| 107 Mora          | 6329.1          | 2935.0          | 2643.6                | 90.07%        | 320.9           | 4.60%         | 52.37           | 0.6053        | 0.1093        | 0.4529        |
| 108 Gocioechea    | 3173.1          | 2344.8          | 1243.5                | 53.03%        | 1123.1          | 34.71%        | 117.21          | 0.2175        | 0.4790        | 0.9392        |
| 109 Santa Ana     | 6145.4          | 3395.3          | 2033.9                | 59.90%        | 1458.6          | 22.15%        | 29.98           | 0.5223        | 0.4296        | 0.6273        |
| 110 Alajuelita    | 2151.4          | 1189.2          | 618.7                 | 52.02%        | 599.9           | 26.52%        | 209.45          | 0.3445        | 0.5044        | 0.9072        |
| 111 Coronado      | 5206.5          | 3835.0          | 3180.2                | 82.92%        | 662.9           | 12.58%        | 122.73          | 0.3548        | 0.1728        | 0.8042        |
| 113 Tibás         | 835.9           | 766.3           | 86.6                  | 11.30%        | 689.6           | 81.31%        | 89.60           | 0.1511        | 0.8999        | 0.9927        |
| 114 Moravia       | 2917.4          | 2453.2          | 1716.0                | 69.95%        | 752.9           | 25.27%        | 72.84           | 0.2889        | 0.3069        | 0.8261        |
| 115 Montes de Oca | 1557.5          | 1421.9          | 606.2                 | 42.64%        | 824.5           | 52.37%        | 65.84           | 0.1708        | 0.5798        | 0.9709        |
| 118 Curridabat    | 1623.1          | 1545.2          | 446.0                 | 28.86%        | 1127.4          | 67.73%        | 64.36           | 0.2500        | 0.7296        | 0.9825        |

| Cantón            | Área total      | Área edificable | Área edificable libre |               | Área construida |               | Densidad        | Índices       |               |               |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|
|                   | ha              | ha              | ha                    | % del total   | ha              | % del total   | hab./ ha urbana | Dispersión    | Compacidad    | Contigüidad   |
| 201 Alajuela      | 26146.4         | 22194.9         | 17037.2               | 76.76%        | 5289.0          | 19.73%        | 53.01           | 0.5491        | 0.2383        | 0.6087        |
| 205 Atenas        | 8391.8          | 4709.0          | 4195.5                | 89.10%        | 586.3           | 6.12%         | 33.25           | 0.7615        | 0.1245        | 0.3730        |
| 208 Poás          | 6646.7          | 5300.8          | 4865.0                | 91.78%        | 461.8           | 6.56%         | 67.84           | 0.7751        | 0.0871        | 0.1840        |
| 301 Cartago       | 19008.5         | 11203.4         | 8992.7                | 80.27%        | 2280.1          | 11.63%        | 63.61           | 0.4207        | 0.2035        | 0.7416        |
| 302 Paraíso       | 16960.1         | 8478.9          | 7839.0                | 92.45%        | 658.8           | 3.77%         | 104.54          | 0.6413        | 0.0777        | 0.4601        |
| 303 La Unión      | 4454.4          | 3373.5          | 2201.5                | 65.26%        | 1242.7          | 26.31%        | 84.98           | 0.4519        | 0.3684        | 0.8435        |
| 306 Alvarado      | 7980.1          | 4332.0          | 4195.0                | 96.84%        | 151.3           | 1.72%         | 90.50           | 0.8829        | 0.0349        | 0.1340        |
| 307 Oreamuno      | 7177.1          | 5573.8          | 5069.6                | 90.95%        | 515.1           | 7.02%         | 86.69           | 0.5464        | 0.0924        | 0.4933        |
| 308 El Guarco     | 8396.2          | 3823.1          | 3212.6                | 84.03%        | 634.5           | 7.27%         | 59.28           | 0.4798        | 0.1660        | 0.5858        |
| 401 Heredia       | 2523.4          | 2473.1          | 753.4                 | 30.46%        | 1731.5          | 68.15%        | 76.18           | 0.2448        | 0.7001        | 0.8926        |
| 402 Barva         | 5613.7          | 4719.2          | 4183.4                | 88.65%        | 538.6           | 9.55%         | 72.54           | 0.5779        | 0.1141        | 0.4731        |
| 403 Santo Domingo | 2527.1          | 2274.0          | 1446.4                | 63.60%        | 851.0           | 32.75%        | 44.04           | 0.5317        | 0.3742        | 0.5527        |
| 404 Santa Bárbara | 5216.0          | 3817.5          | 3294.6                | 86.30%        | 534.2           | 10.03%        | 64.67           | 0.6600        | 0.1399        | 0.4933        |
| 405 San Rafael    | 4812.7          | 4003.7          | 3458.6                | 86.39%        | 547.4           | 11.33%        | 79.27           | 0.4742        | 0.1367        | 0.6374        |
| 406 San Isidro    | 2652.8          | 2202.1          | 1848.4                | 83.94%        | 355.5           | 13.33%        | 61.73           | 0.7112        | 0.1614        | 0.2656        |
| 407 Belén         | 1248.2          | 1184.7          | 495.6                 | 41.84%        | 715.7           | 55.20%        | 32.77           | 0.3680        | 0.6041        | 0.8201        |
| 408 Flores        | 674.6           | 669.5           | 262.7                 | 39.24%        | 407.0           | 60.31%        | 43.26           | 0.3481        | 0.6079        | 0.8886        |
| 409 San Pablo     | 834.8           | 832.3           | 442.1                 | 53.11%        | 391.4           | 46.75%        | 60.57           | 0.3947        | 0.4703        | 0.9269        |
| <b>GAM</b>        | <b>178075.4</b> | <b>122611.5</b> | <b>90563.4</b>        | <b>73.86%</b> | <b>33088.1</b>  | <b>18.00%</b> | <b>75.35</b>    | <b>0.3956</b> | <b>0.2699</b> | <b>0.4247</b> |

Fuente: Estimado a partir de análisis de imágenes Landsat

**Cuadro A.2. Resumen de indicadores de crecimiento urbano por municipio**

|                   | Cantón            | Área total<br>(2do<br>periodo) | Crecimiento |                |   | Tasa<br>interanual<br>equivalente | Índice de<br>dispersión |
|-------------------|-------------------|--------------------------------|-------------|----------------|---|-----------------------------------|-------------------------|
|                   |                   | ha                             | ha          | % del<br>total | % de área<br>construida<br>en periodo inicial | %                                 |                         |
| 1986-1997         | 101 San José      | 3632.6                         | 405.9       | 9.06%          | 12.58%  | 1.08%                             | 0.2081                  |
|                   | 102 Escazú        | 1232.5                         | 386.4       | 11.16%         | 45.67%  | 3.48%                             | 0.4378                  |
|                   | 103 Desamparados  | 1668.8                         | 443.5       | 7.43%          | 36.20%  | 2.85%                             | 0.4098                  |
|                   | 106 Aserrí        | 332.7                          | 65.1        | 2.20%          | 24.31%  | 2.00%                             | 0.5765                  |
|                   | 107 Mora          | 265.9                          | 87.3        | 1.38%          | 48.89%  | 3.68%                             | 0.6724                  |
|                   | 108 Gocioechea    | 1015.3                         | 169.6       | 5.34%          | 20.05%  | 1.68%                             | 0.3424                  |
|                   | 109 Santa Ana     | 1221.8                         | 384.1       | 6.25%          | 45.85%  | 3.49%                             | 0.6029                  |
|                   | 110 Alajuelita    | 494.3                          | 95.4        | 4.43%          | 23.92%  | 1.97%                             | 0.4457                  |
|                   | 111 Coronado      | 556.2                          | 133.7       | 2.57%          | 31.63%  | 2.53%                             | 0.4250                  |
|                   | 113 Tibás         | 649.6                          | 87.3        | 10.44%         | 15.52%  | 1.32%                             | 0.2328                  |
|                   | 114 Moravia       | 626.0                          | 126.5       | 4.33%          | 25.32%  | 2.07%                             | 0.4364                  |
|                   | 115 Montes de Oca | 716.5                          | 165.8       | 10.64%         | 30.10%  | 2.42%                             | 0.3137                  |
|                   | 118 Curridabat    | 910.7                          | 251.9       | 15.52%         | 38.24%  | 2.99%                             | 0.4243                  |
|                   | 201 Alajuela      | 4125.1                         | 948.8       | 3.63%          | 29.87%  | 2.40%                             | 0.6709                  |
|                   | 205 Atenas        | 426.3                          | 118.1       | 1.41%          | 38.31%  | 2.99%                             | 0.8364                  |
|                   | 208 Poás          | 287.3                          | 65.3        | 0.98%          | 29.44%  | 2.37%                             | 0.8455                  |
|                   | 301 Cartago       | 1940.9                         | 327.7       | 1.72%          | 20.31%  | 1.70%                             | 0.5119                  |
|                   | 302 Paraíso       | 532.7                          | 103.0       | 0.61%          | 23.96%  | 1.97%                             | 0.7450                  |
|                   | 303 La Unión      | 914.5                          | 297.5       | 6.68%          | 48.21%  | 3.64%                             | 0.5999                  |
|                   | 306 Alvarado      | 111.6                          | 13.2        | 0.17%          | 13.45%  | 1.15%                             | 0.8960                  |
|                   | 307 Oreamuno      | 452.4                          | 37.3        | 0.52%          | 8.97%   | 0.78%                             | 0.5790                  |
|                   | 308 El Guarco     | 523.7                          | 128.4       | 1.53%          | 32.49%  | 2.59%                             | 0.5061                  |
|                   | 401 Heredia       | 1313.4                         | 350.5       | 13.89%         | 36.40%  | 2.86%                             | 0.4255                  |
|                   | 402 Barva         | 369.3                          | 120.8       | 2.15%          | 48.61%  | 3.67%                             | 0.7165                  |
|                   | 403 Santo Domingo | 582.1                          | 170.0       | 6.73%          | 41.25%  | 3.19%                             | 0.6925                  |
| 404 Santa Bárbara | 370.2             | 123.9                          | 2.38%       | 50.33%         | 3.78%   | 0.7490                            |                         |
| 405 San Rafael    | 386.1             | 114.2                          | 2.37%       | 42.01%         | 3.24%   | 0.6032                            |                         |

|               | Cantón            | Área total<br>(2do<br>periodo) | Crecimiento   |                |   | Tasa<br>interanual<br>equivalente | Índice de<br>dispersión |
|---------------|-------------------|--------------------------------|---------------|----------------|---|-----------------------------------|-------------------------|
|               |                   | ha                             | ha            | % del<br>total | % de área<br>construida<br>en periodo inicial | %                                 |                         |
|               | 406 San Isidro    | 230.5                          | 52.9          | 1.99%          | 29.80%  | 2.40%                             | 0.7779                  |
|               | 407 Belén         | 639.7                          | 143.6         | 11.51%         | 28.96%  | 2.34%                             | 0.4224                  |
|               | 408 Flores        | 270.8                          | 83.6          | 12.39%         | 44.66%  | 3.41%                             | 0.5196                  |
|               | 409 San Pablo     | 245.6                          | 57.3          | 6.87%          | 30.45%  | 2.45%                             | 0.5847                  |
|               | <i>GAM</i>        | <i>27044.9</i>                 | <i>6058.4</i> | <i>3.40%</i>   | <i>28.87%</i>                                 | <i>2.33%</i>                      | <i>0.4783</i>           |
| 1997-2010     | 101 San José      | 3860.0                         | 227.4         | 5.07%          | 6.26%   | 0.47%                             | 0.1720                  |
|               | 102 Escazú        | 1448.5                         | 216.0         | 6.24%          | 17.53%  | 1.25%                             | 0.4099                  |
|               | 103 Desamparados  | 1911.0                         | 242.2         | 4.06%          | 14.51%  | 1.05%                             | 0.3789                  |
|               | 106 Aserri        | 417.2                          | 84.5          | 2.86%          | 25.40%  | 1.76%                             | 0.5255                  |
|               | 107 Mora          | 320.9                          | 55.0          | 0.87%          | 20.68%  | 1.46%                             | 0.6402                  |
|               | 108 Gocioechea    | 1123.1                         | 107.8         | 3.40%          | 10.62%  | 0.78%                             | 0.3350                  |
|               | 109 Santa Ana     | 1458.6                         | 236.8         | 3.85%          | 19.38%  | 1.37%                             | 0.5390                  |
|               | 110 Alajuelita    | 599.9                          | 105.6         | 4.91%          | 21.36%  | 1.50%                             | 0.4264                  |
|               | 111 Coronado      | 662.9                          | 106.7         | 2.05%          | 19.17%  | 1.36%                             | 0.4968                  |
|               | 113 Tibás         | 689.6                          | 40.0          | 4.78%          | 6.15%   | 0.46%                             | 0.1912                  |
|               | 114 Moravia       | 752.9                          | 127.0         | 4.35%          | 20.29%  | 1.43%                             | 0.4319                  |
|               | 115 Montes de Oca | 824.5                          | 108.0         | 6.93%          | 15.07%  | 1.09%                             | 0.2260                  |
|               | 118 Curridabat    | 1127.4                         | 216.7         | 13.35%         | 23.80%  | 1.66%                             | 0.3299                  |
|               | 201 Alajuela      | 5289.0                         | 1164.0        | 4.45%          | 28.22%  | 1.93%                             | 0.6238                  |
|               | 205 Atenas        | 586.3                          | 159.9         | 1.91%          | 37.51%  | 2.48%                             | 0.8065                  |
|               | 208 Poás          | 461.8                          | 174.5         | 2.63%          | 60.75%  | 3.72%                             | 0.8197                  |
|               | 301 Cartago       | 2280.1                         | 339.2         | 1.78%          | 17.48%  | 1.25%                             | 0.5747                  |
|               | 302 Paraíso       | 658.8                          | 126.1         | 0.74%          | 23.67%  | 1.65%                             | 0.8182                  |
|               | 303 La Unión      | 1242.7                         | 328.2         | 7.37%          | 35.89%  | 2.39%                             | 0.4671                  |
|               | 306 Alvarado      | 151.3                          | 39.7          | 0.50%          | 35.56%  | 2.37%                             | 0.9171                  |
| 307 Oreamuno  | 515.1             | 62.6                           | 0.87%         | 13.85%         | 1.00%   | 0.7033                            |                         |
| 308 El Guarco | 634.5             | 110.8                          | 1.32%         | 21.15%         | 1.49%   | 0.5699                            |                         |
| 401 Heredia   | 1731.5            | 418.1                          | 16.57%        | 31.84%         | 2.15%   | 0.2863                            |                         |
| 402 Barva     | 538.6             | 169.3                          | 3.02%         | 45.84%         | 2.95%   | 0.6426                            |                         |

|  | <b>Cantón</b>     | <b>Área total<br/>(2ndo periodo)<br/>ha</b> | <b>Crecimiento</b> |                    |  | <b>Tasa interanual equivalente<br/>%</b> | <b>Índice de dispersión</b> |
|--|-------------------|---|--------------------|--------------------|--|--|-----------------------------|
|  |                   |   | <i>ha</i>          | <i>% del total</i> | <i>% de área construida en periodo inicial</i> |  |                             |
|  | 403 Santo Domingo | 851.0                                       | 268.8              | 10.64%             | 46.18%   | 2.96%                                    | 0.5919                      |
|  | 404 Santa Bárbara | 534.2                                       | 164.0              | 3.14%              | 44.30%   | 2.86%                                    | 0.7069                      |
|  | 405 San Rafael    | 547.4                                       | 161.3              | 3.35%              | 41.77%   | 2.72%                                    | 0.6236                      |
|  | 406 San Isidro    | 355.5                                       | 125.0              | 4.71%              | 54.24%   | 3.39%                                    | 0.7552                      |
|  | 407 Belén         | 715.7                                       | 76.0               | 6.09%              | 11.87%   | 0.87%                                    | 0.4105                      |
|  | 408 Flores        | 407.0                                       | 136.2              | 20.19%             | 50.28%   | 3.18%                                    | 0.4074                      |
|  | 409 San Pablo     | 391.4                                       | 145.8              | 17.47%             | 59.36%   | 3.65%                                    | 0.4407                      |
|  | <b>GAM</b>        | <b>33088.1</b>                              | <b>6043.1</b>      | <b>3.39%</b>       | <b>22.34%</b>                                  | <b>1.56%</b>                             | <b>0.4768</b>               |

Fuente: Estimado a partir de análisis de imágenes Landsat

**Cuadro A.3. Determinantes de la estructura urbana de la región metropolitana de San José, 1986–2010.  
Estimación con mínimos cuadrados ordinarios en dos etapas**

| Variable                         | Modelo 1                    |          | Modelo 2                    |          | Modelo 3                    |          | Modelo 4                     |          |
|----------------------------------|-----------------------------|----------|-----------------------------|----------|-----------------------------|----------|------------------------------|----------|
|                                  | <i>Densidad poblacional</i> |          | <i>Índice de dispersión</i> |          | <i>Índice de compacidad</i> |          | <i>Índice de contigüidad</i> |          |
|                                  | Coef.                       | Estad. t | Coef.                       | Estad. t | Coef.                       | Estad. t | Coef.                        | Estad. t |
| Intercepto                       | <b>6.9355</b>               | (3.400)  | 0.3935                      | (0.576)  | -0.3609                     | (0.571)  | 1.0545                       | (0.784)  |
| Distancia a San José*            | <b>-0.3959</b>              | (2.489)  | <b>0.1217</b>               | (2.990)  | <b>-0.0776</b>              | (2.061)  | <b>-0.2058</b>               | (2.568)  |
| Distancia a ciudad*              | -0.0726                     | (0.911)  | -0.0469                     | (1.301)  | <b>0.0557</b>               | (1.670)  | 0.0892                       | (1.256)  |
| Distancia a zona industrial*     | 0.1359                      | (1.361)  | <b>0.0643</b>               | (1.888)  | 0.0032                      | (0.101)  | -0.0859                      | (1.281)  |
| Trabajadores (normalizado)       | -0.0464                     | (0.972)  | <b>0.0318</b>               | (2.692)  | 0.0111                      | (1.015)  | <b>-0.0604</b>               | (2.598)  |
| Población estimada               | -                           |          | <b>-0.1187</b>              | (4.581)  | <b>0.0627</b>               | (2.616)  | <b>0.1465</b>                | (2.870)  |
| Índice de ingresos               | <b>-0.1265</b>              | (3.250)  | -0.0153                     | (1.260)  | <b>0.0245</b>               | (2.178)  | 0.0249                       | (1.040)  |
| Pendiente promedio               | -0.0070                     | (0.556)  | 0.0064                      | (1.443)  | 0.0039                      | (0.954)  | -0.0077                      | (0.889)  |
| Densidad de pozos (2 años)**     | <b>-0.1773</b>              | (4.296)  | 0.0086                      | (0.704)  | -0.0019                     | (0.172)  | -0.0158                      | (0.658)  |
| Porcentaje de área dentro de LCU | -0.0495                     | (0.230)  | <b>-0.1024</b>              | (1.675)  | <b>0.4913</b>               | (8.682)  | 0.1352                       | (1.122)  |
| Uso agrícola hortalizas (1 = sí) | 0.2303                      | (1.493)  | -0.0438                     | (0.913)  | 0.0158                      | (0.357)  | 0.0796                       | (0.843)  |
| Uso agrícola café (1 = sí)       | 0.0773                      | (0.977)  | <b>0.0921</b>               | (3.803)  | <b>-0.0454</b>              | (2.024)  | <b>-0.1237</b>               | (2.593)  |

**Cuadro A.4. Determinantes del crecimiento urbano de la región metropolitana de San José, 1986–2010.**  
**Estimación con mínimos cuadrados ordinarios en dos etapas\***

| Variable                         | Modelo 5              |          | Modelo 6                             |          | Modelo 7             |          |
|----------------------------------|-----------------------|----------|--------------------------------------|----------|----------------------|----------|
|                                  | Área construida nueva |          | Tasa de crec. Interanual equivalente |          | Índice de dispersión |          |
|                                  | Coef.                 | Estad. t | Coef.                                | Estad. t | Coef.                | Estad. t |
| Intercepto                       | -5.3985               | (1.333)  | -0.7966                              | (0.257)  | <b>-1.0690</b>       | (2.068)  |
| Distancia a San José**           | <b>0.6135</b>         | (2.453)  | 0.0456                               | (0.239)  | <b>0.1845</b>        | (5.778)  |
| Distancia a ciudad**             | <b>-0.4847</b>        | (2.571)  | <b>-0.4108</b>                       | (2.849)  | -0.0110              | (0.457)  |
| Distancia a zona industrial**    | <b>0.4218</b>         | (1.925)  | <b>0.3419</b>                        | (2.040)  | <b>0.0591</b>        | (2.113)  |
| Trabajadores (normalizado)       | 0.1306                | (1.130)  | -0.0308                              | (0.349)  | <b>0.0441</b>        | (2.986)  |
| Población estimada               | <b>0.4122</b>         | (2.780)  | <b>-0.3842</b>                       | (3.387)  | <b>-0.0532</b>       | (2.811)  |
| Índice de ingresos               | <b>0.2456</b>         | (2.311)  | 0.0642                               | (0.790)  | 0.0095               | (0.702)  |
| Pendiente promedio               | <b>0.0747</b>         | (2.562)  | <b>0.0470</b>                        | (2.108)  | -0.0009              | (0.253)  |
| Densidad de pozos (2 años)***    | <b>0.2174</b>         | (1.851)  | -0.0605                              | (0.673)  | -0.0050              | (0.335)  |
| Porcentaje de área dentro de LCU | 0.4191                | (0.978)  | 0.1734                               | (0.529)  | <b>-0.1735</b>       | (3.170)  |
| Uso agrícola hortalizas (1 = sí) | <b>-1.1879</b>        | (3.510)  | <b>-0.8910</b>                       | (3.441)  | -0.0025              | (0.058)  |
| Uso agrícola café (1 = sí)       | <b>0.5056</b>         | (2.968)  | <b>0.5574</b>                        | (4.278)  | <b>0.0614</b>        | (2.824)  |

\* Las variables corresponden al año inicial del periodo de crecimiento.

\*\* Variables endógenas; instrumentadas con distancia al centro de cada ciudad según el Atlas 2008 del ITCR

\*\*\* Cantidad de permisos de explotación de agua subterránea mediante pozos aprobados por el Servicio Nacional de Aguas, Riego y Avenamiento en el año inmediatamente anterior y durante el mismo año en que se asigna el dato.

**En fondo gris y color rojo:** coeficientes significativos al 90%.