



Revista Brasileira de Gestão Urbana

scielo.br/urbe



Las cuentas ambientales como herramienta para analizar el metabolismo urbano: estudio de caso de la ciudad de Guatemala

Environmental Accounts as a Tool for Analyzing Urban Metabolism: a case study of Guatemala City

Alejandra Michelle Tercero Villagrán ^[a] 

Guatemala

^[a] Universidad Rafael Landívar, Instituto de Investigación en Ciencias Naturales y Tecnología (Iarna)

Juan Miguel Goyzueta ^[b] 

Guatemala

^[b] Universidad Rafael Landívar

Ana Paulina Reyes Díaz ^[b] 

Guatemala

^[b] Universidad Rafael Landívar

Como citar: Villagrán, A. M. T., Goyzueta, J. M., & Díaz, A. P. R. (2025). Las cuentas ambientales como herramienta para analizar el metabolismo urbano: estudio de caso de la ciudad de Guatemala. *urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 17, e20240267. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.017.e20240267>

AMTV Investigadora del Departamento de Tecnología del Instituto de Investigación en Ciencias Naturales y Tecnología (Iarna) de la Universidad Rafael Landívar, e-mail: amtercero@url.edu.gt

JMG economista, estudiante de maestría en España, e-mail: jmgoyzueta@gmail.com

APRD Maestría en Educación y Desarrollo Profesional Docente, e-mail: apreysd@gmail.com

Resumen

El área metropolitana de Guatemala es el territorio más poblado del país y el que concentra mayor actividad económica, ejerciendo presión sobre los recursos naturales. A nivel nacional la población urbana está en aumento. El marco de metabolismo urbano ha sido ampliamente utilizado para comprender las dinámicas campo-ciudad ¿Mejoran los procesos urbanos la eficiencia económica de los recursos naturales? ¿En qué medida? Utilizando el concepto de metabolismo urbano y los datos del Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica (SCAE) se comparó la eficiencia con la que el departamento de Guatemala gestiona el agua, los combustibles fósiles, los desechos sólidos y la energía eléctrica, versus el resto del país. Encontramos que, la zona metropolitana de Guatemala hace uso más eficiente de los recursos evaluados, extrayendo más valor económico por unidad de recursos consumida que la media nacional. Sin embargo, los consumos de agua e hidrocarburos tienen una brecha de eficiencia que parece estarse cerrando. Por otra parte, la brecha de eficiencia es más pequeña que la que exhiben las megaciudades internacionales, lo que permite afirmar que Guatemala aún puede explotar las economías de escala de la urbanización, pero enfrenta ya retos de congestión urbana.

Palabras clave: Ecología integral. Ciudades. Agua. Energía. Recursos naturales.

Abstract

The metropolitan area of Guatemala is the most populated territory in the country and the one that concentrates the greatest economic activity, putting pressure on natural resources. At the national level, the urban population is increasing. The urban metabolism framework has been widely used to understand rural-urban dynamics. Do urban processes improve the economic efficiency of natural resources? To what extent? Using the concept of urban metabolism and data from the Environmental and Economic Accounting System (SCAE), we compared the efficiency with which the department of Guatemala manages water, fossil fuels, solid waste, and electricity, versus the rest of the country. We found that, the metropolitan area of Guatemala makes more efficient use of the resources evaluated, extracting more economic value per unit of resources consumed than the national average. However, water consumption, hydrocarbon use, and solid waste generation have an efficiency gap between the department and the rest of the country seems to be closing. On the other hand, the efficiency gap is smaller than that of international megacities, suggesting that Guatemala can still exploit the economies of scale of urbanization, but is already facing challenges of urban congestion.

Keywords: Integral ecology. Cities. Water. Energy. Natural resources.

Introducción

A nivel mundial se ha visto en décadas recientes un crecimiento acelerado de las áreas urbanas. Se estima que en 2050 el 70% de la población mundial será urbana (Facchini, Mele, & Caldarelli, 2021). Guatemala no es la excepción y presenta una alta concentración de habitantes y de actividades económicas en su capital y área metropolitana (Lungo & Habana, 2001). El departamento de Guatemala constituye oficialmente la región metropolitana del país. En 2018, este departamento contenía al 20% de la población nacional (Instituto Nacional de Estadística, 2019), y en el 2013, concentraba al 62.1% de las empresas del país (Banco de Guatemala, 2014).

El área metropolitana de Guatemala tiene más de 3 millones de habitantes, 91% urbanos, en 17 municipios autónomos responsables de la gestión del agua y residuos. En 2018, el 17% de su territorio (364 km²) estaba edificado, mientras el resto se destinaba a pastos, cultivos, bosques y cuerpos de agua. La expansión urbana crece a una tasa anual del 1.2%. Guatemala destaca por ser un país megadiverso y anteriormente, se caracterizaba por su riqueza en recursos naturales, sin embargo, éstos se han visto depredados a través del tiempo debido a una alta extracción y a un inapropiado tratamiento de desechos, el agotamiento de agua potable, entre otros (IARNA-URL, 2017). Entre 2003 y 2020, Guatemala perdió más de 2 millones de hectáreas de bosques y vegetación, mientras aumentaron las áreas urbanizadas, agrícolas y de pastos. Esta deforestación contribuye a la pérdida, degradación y fragmentación de hábitats, siendo la urbanización un factor clave en la presión sobre la biodiversidad (Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAGA) & Dirección de Información, 2021 y Pineda, 2022).

Hidrológicamente, la región metropolitana se encuentre situada entre cuatro grandes cuencas: Achiguate, María Linda, Los Esclavos y Motagua. Principalmente, el departamento se abastece de fuentes superficiales (ríos Xayá, Pixcayá, Pansalic y Teocinte) y subterráneas (proveniente de pozos, particularmente del Valle de la Ermita). La urbanización y la población se han clasificado como fueras impulsoras de las presiones sobre el recurso hídrico en este territorio (Fundación para la Conservación del Agua de la Región Metropolitana de Guatemala, 2022).

La falta de una ley específica de agua dificulta la protección del recurso hídrico. Algunas de las malas prácticas que se dan en el territorio incluyen: no pagar por el costo real de recibir el servicio de agua, desperdicio de agua en los hogares y conexiones ilegales. Las presiones del recurso hídrico son la disminución del ingreso de agua en el sistema superficial y subterráneo por el cambio climático y la impermeabilización del suelo, el aumento de la demanda, y las aguas residuales no tratadas y vertidas en aguas superficiales.

Por otra parte, la generación de desechos sólidos en municipio de Guatemala es de 668 759 toneladas métricas por año (Mosquera, n.d.), con destino del basurero municipal de la zona 3 de ciudad de Guatemala y el vertedero de AMSA en Villa Nueva. En ciudad de Guatemala, parte del metano se utiliza para la generación de energía eléctrica, pero dada la poca separación de desechos, si bien existen procesos de reciclaje, estos son limitados.

Los datos anteriores, permiten cuestionar la administración y gestión de los recursos ambientales. El presente artículo, se pregunta: ¿Se cumple en Guatemala el supuesto de eficiencia constante en el uso de los recursos ambientales a nivel de los distintos territorios?, ¿Es el departamento de Guatemala eficiente en su consumo de recursos agua y energía, y generación de desechos sólidos, en comparación con el resto del país y las megaciudades del mundo?

El objetivo de la presente investigación es estimar los consumos de agua, energía, y la generación de desechos sólidos en el área metropolitana de Guatemala a partir de los datos del Sistema de Contabilidad Económica y Ambiental. La comparación de los datos de SCAE con datos oficiales, permitirá evaluar si el área metropolitana de Guatemala se beneficia de las bondades de la aglomeración o si por el contrario sufre las desventajas de la congestión urbana.

La eficiencia en el manejo de recursos urbanos varía según infraestructura, políticas y gobernanza. Un estudio de Kennedy et al. (2015) comparó megaciudades como México, Buenos Aires, Londres y Tokio en términos de población, consumo energético, PIB y desechos. Aunque el departamento de Guatemala tiene solo 3 millones de habitantes, su comparación con estas ciudades ayuda a identificar oportunidades y desafíos para una gestión más sostenible.

Los indicadores seleccionados reflejan insumos esenciales para las ciudades y son clave en estudios de metabolismo urbano. El consumo de agua indica la presión sobre los cuerpos hídricos, mientras que la energía impulsa el funcionamiento urbano y su análisis permite evaluar la sostenibilidad. La generación de desechos sólidos revela patrones de consumo y gestión ambiental. Estos indicadores son fundamentales para la formulación de políticas urbanas y ambientales. En una primera parte se presentará el marco teórico y conceptual del metabolismo urbano, seguido por el del Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica (SCAE). Luego la metodología se divide en cuatro etapas. La primera busca regionalizar los datos del SCAE a escala departamental a través de sistemas de información geográfica para estimar los consumos de los recursos de agua y energía, así como la generación de desechos sólidos en el área metropolitana de Guatemala. Debido a que la regionalización parte del supuesto de una eficiencia constante en el uso de los recursos en todo el territorio nacional, en una segunda parte se recopilaron los datos de los mismos indicadores, pero esta vez, reportados por entidades oficiales a partir de la observación y encuestas. En la tercera parte, se realizaron gráficas que permitieran comparar ambos sets de datos para entender la eficiencia del uso de recursos en la región. En la cuarta etapa, se compararon los datos de uso de recursos en Guatemala con los datos de megaciudades del mundo. El siguiente punto presenta los resultados y luego una discusión. Por último, se abordan las conclusiones del artículo.

Marco teórico conceptual

La literatura económica reconoce que en las ciudades convergen dos fenómenos en torno a la densidad poblacional que operan dirección opuesta (Brinkman, 2016). Por un lado, las economías de aglomeración suponen una externalidad positiva que puede redundar en una mayor intensidad del aprovechamiento económico de los recursos. Por el otro, la congestión que también surge como

consecuencia de la densidad poblacional obra en dirección contraria y redundante en el desperdicio de recursos. La predominancia de uno u otro efecto es una cuestión empírica y de ahí la importancia de los análisis sobre metabolismo urbano.

El metabolismo urbano

El metabolismo urbano es un enfoque conceptual que asemeja las ciudades a organismos vivos o ecosistemas. Así, estudia cómo éstas consumen agua, energía y materiales para transformarlos en productos y servicios, y luego reciclarlos o acumular desechos o emisiones (figura 1). La naturaleza tiene sistemas circulares, en los que todos los productos se reutilizan o reciclan. Se requiere de políticas, infraestructura y procesos intencionales, para que las ciudades puedan lograr esto mismo. De lo contrario, las ciudades siguen procesos lineales que acumulan desechos y agotan recursos.

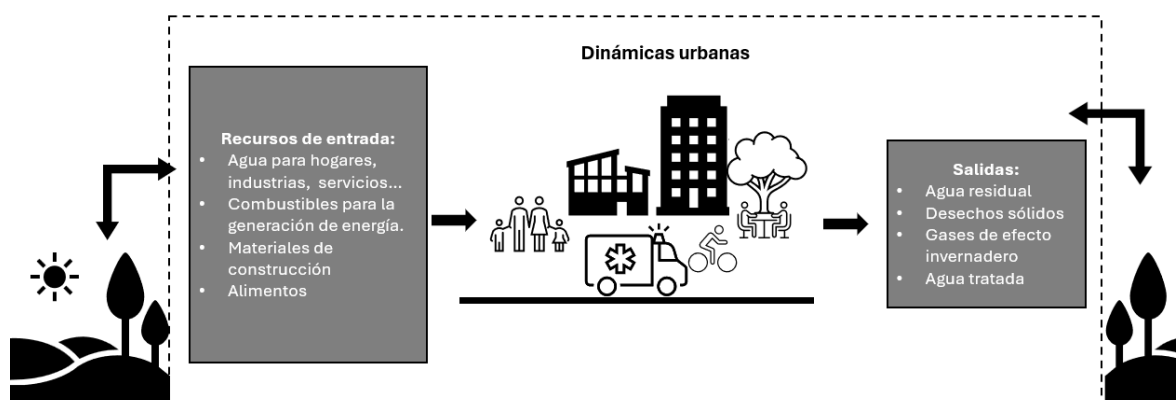


Figura 1: Diagrama simplificado del metabolismo urbano. Fuente: Tercero A.M. (2025) [Imagen creada].

Este marco conceptual se ha venido desarrollando desde hace varias décadas. Según Musango et al. (2017), los inicios de este concepto pueden trazarse desde la economía, con Marx, (1883). Luego, el químico y médico Wely (1894) y el sociólogo Burgess (1925). Wolman (1965) utilizó el concepto desde la rama de la ingeniería civil. El marco fue luego desarrollado por Newman (1999), quien reconoció también que estos recursos pueden o no ser equitativamente distribuidos entre la población y que esto enmarca también un grado más de eficiencia de la ciudad.

Hoy en día el metabolismo urbano se comprende como “la suma total de los flujos técnicos y socioeconómicos que ocurren dentro en las ciudades, resultando en procesos, producción de energía y eliminación de desechos” (Voukkali & Zorpas, 2022). Es un concepto que puede abordarse desde diversos marcos metodológicos.

Varios autores se han aproximado a la cuantificación de los flujos de recursos de una ciudad desde los enfoques metodológicos de análisis de flujo de materiales, análisis de ciclo de vida, análisis de huella ambiental y análisis energéticos. Sin embargo uno de los principales retos que enfrentan estos análisis, es

la falta de datos oficiales y cuantitativos acerca del uso de recursos materiales (Voukkali & Zorpas, 2022). Se requiere de un nuevo conjunto de datos que permita llenar las carencias que dificultan los estudios de metabolismo urbano y que permitan identificar a los responsables de los flujos de recursos en las ciudades. Así mismo, es importante, que los datos puedan ser comparables entre ciudades y países.

El sistema de contabilidad ambiental y económica (SCAE) se presenta como una opción atractiva para suplir la falta de datos que permitan realizar estudios de metabolismo urbano. El marco central SCAE parte de la transformación de los flujos monetarios del Sistema de Cuentas Nacionales (SCN) en flujos materiales. El SCN, se encarga de medir la totalidad de actividades económicas del país para generar indicadores, como el Producto Interno Bruto (PIB), integrando actividades residenciales, agrícolas, industriales, de transporte y minería, entre otras. A partir de ahí, el SCAE estima los impactos de las distintas transacciones económicas sobre dimensiones ambientales como: la extracción de agua, la generación de residuos sólidos, la emisión de gases de efecto invernadero, etc. Todas las dimensiones mencionadas anteriormente, son evaluadas para los distintos sectores económicos.

Desde los debates sobre desarrollo sostenible iniciados con la Agenda 21 en la Cumbre de Río de 1992, y tras años de evolución, el Comité de Expertos en Contabilidad Ambiental y Económica de la ONU (UNCEE) adoptó en 2012 el SCAE como el primer estándar internacional para la contabilidad ambiental-económica. SCAE analiza la relación entre economía y medio ambiente, registrando cambios en los activos ambientales e integrando estadísticas ambientales en los sistemas económicos para mejorar la toma de decisiones.

El marco central del SCAE es flexible y modular, adaptándose a cada país y permitiendo la comparación internacional. Organiza información con reglas contables estandarizadas para generar indicadores coherentes en políticas (Naciones Unidas et al., 2014). Sin embargo, aún enfrenta desafíos en la valoración de activos naturales y flujos económicos, estos están en revisión desde 2024.

El SCAE se cuantifica a escala nacional. Sin embargo, las actividades económicas pueden ser medidas por medio de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Por una parte, la clasificación de mapas de uso del suelo informa acerca de las actividades económicas agrícolas de un territorio. Por otra parte, la teledetección espectral de luces nocturnas generadas en un territorio es directamente proporcional a su actividad económica industrial (Ghosh, y otros, 2010). Tanto la proporción de luces nocturnas generas por un territorio, como su actividad agrícola, deberían indicar el grado de contribución de determinado territorio al PIB nacional en los ámbitos agrícola, residencial, industrial y comercial (Cao, Zhang, Xia, & Bai, 2022). Ambos métodos han impulsado una larga serie de investigaciones tanto geofísicas como socioeconómicas.

Es importante hacer constar que, el criterio de repartición del PIB en base a luces nocturnas y usos del suelo lleva implícito el supuesto de una eficiencia constante a lo largo del territorio. Es decir, se atribuye a una actividad económica un grado de impacto sobre los recursos en proporción directa a su participación territorial. Lo mismo ocurre con los impactos asociados a los consumos finales, que se reparten según el ingreso agregado del territorio. Regionalizar los datos de SCAE, implica atribuir la misma cantidad de

consumo de recursos para la producción de una determinada cantidad de un producto X, en un departamento predominantemente rural que, en un departamento predominantemente urbano, como lo es el área metropolitana.

Metodología

Regionalización de las cuentas nacionales y ambientales

Luces nocturnas para estimar consumos de los sectores industrial y comercial

En una primera fase, se trabajó con las luces nocturnas (NTL por sus siglas en inglés) como factor de repartición de la actividad económica a escala departamental. Para ello, se descargó la imagen NTL del año 2010 de del Sistema Operativo de Escaneo Lineal del Programa de Satélites Meteorológicos de Defensa (DMSP-OLS) y del año 2020 a partir del Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS).

En base a la metodología descrita por Ghosh, y otros (2010), se calculó la intensidad de luz por píxel para cada departamento, generando así la suma total de luz (SL) por departamento para ambos años.

Luego, se calculó el volumen de las actividades económicas industriales y comerciales para cada departamento:

$$AE_{ij} = \frac{SL_i}{SL} \times AE_j$$

en donde la actividad económica j dentro del departamento i tiene un valor equivalente al producto de la proporción de la suma de luces nocturnas de ese departamento en relación con el total nacional por el volumen de esa misma actividad económica a nivel nacional.

Clasificación de usos del suelo para estimar consumos del sector agrícola

Para regionalizar el PIB agrícola, se recurrió a los mapas oficiales de uso del suelo publicados por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA) en los años 2012 y 2020. El PIB agrícola fue repartido así:

$$AE_{ij} = \frac{L_{ij}}{L_j} \times AE_j$$

en donde el volumen de la actividad económica agrícola j dentro del departamento i es el producto de su participación en el uso de tierra correspondiente a esa actividad a nivel nacional.

Construcción de las series observadas de contraste

Para construir las series de datos observados se procedió a consultar las fuentes oficiales disponibles. En varios casos, fue necesario hacer ajustes para completar las series de tiempo para el periodo 2013-2020.

Consumos de energía eléctrica en todos los sectores

Se obtuvo a través de fuentes oficiales el dato de consumo agregado de electricidad en el departamento de Guatemala para los años 2022 y 2021. Por otro lado, con los datos del número de hogares para los años censales 2002 y 2018 y las proyecciones oficiales de población, se completó la serie de hogares extrapolando la ratio de habitantes por hogar para todo el periodo 2013-20. Luego, se extrapoló el consumo agregado de electricidad por hogar y se completó la serie.

Es decir, el consumo agregado de electricidad por año fue calculado así:

$$(1) H_t = \frac{P_t}{(D_0 + \alpha_D t)}$$

$$(2) R_t = \frac{E_t}{H_t}$$

$$(3) E_t = H_t(R_0 + \Delta_R t)$$

en donde la ecuación (1) permite derivar el número de hogares H en cada año t a partir de la población oficial P proyectada para cada año y el número D de habitantes por hogar, esta última ratio extrapolada usando la pendiente α asociada al cambio anual en la ratio; la ecuación (2) establece la ratio R de consumo de electricidad por hogar, que se calcula para los dos años con datos directamente observados; y la ecuación (3) permite derivar el consumo de electricidad E para todos los demás t años de la serie, a partir del número de hogares H y la estimación de la ratio R de consumo de electricidad por hogar, que se obtiene aplicando la pendiente Δ de esta misma ratio en relación con los dos años para los que se calcula directamente en la anterior ecuación.

Consumos de hidrocarburos para el sector residencial

Se consideró el consumo residencial de gasolina y diésel según datos oficiales del número de vehículos (automotores y motocicletas) en el departamento de Guatemala, así como del gasto medio en combustibles por vehículo y de los precios medios del combustible. Se estimaron los consumos agregados de combustibles para todo el departamento. La flota total de vehículos fue obtenida mediante los datos públicos de la administración tributaria y se consideraron todos los vehículos de uso privado. El gasto medio en combustibles por vehículo fue obtenido a partir de tres rondas de encuestas de consumo del Instituto Nacional de Estadística (INE), para los años 2006, 2011 y 2014. Se tuvo en cuenta el gasto medio por vehículo para todos los hogares del departamento que contaban con vehículos privados como medio

exclusivo de transporte. Del Ministerio de Energía y Minas (MEM) se obtuvo el precio medio por galón de combustible para los meses en que se aplicó cada ronda de la encuesta de consumo y, de esa forma, se derivó el consumo medio por vehículo expresado en galones de combustible. Usando las tres observaciones directas, se calculó la pendiente media anual y se completó la serie para los años faltantes. Finalmente, se calculó el consumo agregado de combustibles por año aplicando los coeficientes respectivos de consumo a la flota de automotores y motocicletas.

Este proceso puede resumirse en un procedimiento de dos pasos:

$$(4) S_{it} = \frac{U_t}{ps_t}$$

$$(5) F_t = \sum_{i=1}^I (S_{io} + \partial_{si}t)M_{it}$$

en donde el consumo agregado de combustibles F en el periodo t es la sumatoria de los coeficientes S de consumo por vehículo para cada i clase de vehículo, multiplicados por la flota existente M de cada clase de vehículos en ese periodo. Los coeficientes S de consumo por vehículo se estiman a partir de los datos observados –cada una de las 3 rondas de las encuestas de consumo–, mediante mínimos cuadrados ordinarios, aplicando un intercepto S_{io} y una pendiente anual ∂_{si} . Estos mismos coeficientes S se obtienen a partir del dato de consumo en moneda local U y el precio medio de los combustibles ps en cada periodo de aplicación de la encuesta de consumo.

Consumos de agua en el sector residencial

La estimación agregada de consumo de agua residencial también toma como punto de partida la encuesta de consumo del INE, la cual refleja un valor de gasto de agua por hogar. Al combinar esta información con la tabla de precios del agua municipal, se obtiene el consumo de agua por hogar en metros cúbicos. De esta forma, puede completarse una serie de tiempo de consumo de agua, estimando los valores faltantes a partir de la tendencia de las tres rondas de aplicación de la encuesta de consumo.

Formalmente, se resume así:

$$(6) W_t = \sum_{i=1}^N \frac{w_{it}}{Npw_{it}}$$

$$(7) \phi_t = (W_o + \beta_w t)H_t$$

en donde el consumo de agua por hogar en metros cúbicos W para cada t periodo viene dado por la media poblacional de los cocientes entre el gasto w de cada i hogar y los precios pw del agua aplicable a esos mismos hogares según la tabla de precios municipales. El consumo agregado de agua ϕ es simplemente el producto del consumo medio por hogar –extrapolado con mínimos cuadrados ordinarios para completar la serie– y el número de hogares H estimado en la ecuación (1).

Generación de desechos sólidos para todos los sectores

Para obtener los datos agregados de generación de desechos sólidos, se asumieron las cifras de González-(2023) y de Universidad Rafael Landívar (2003). Combinando estos datos con las proyecciones oficiales de población del INE, se determinó la generación de desechos sólidos anual por habitante y se completó la serie para todo el departamento.

La estimación constó de dos pasos relativamente sencillos:

$$(8) \omega_t = \frac{T_t}{P_t}$$

$$(9) T_t = (\omega_o + \varphi_{\omega} t) P_t$$

en donde el coeficiente de generación de residuos por habitante ω se estima directamente para los dos t años que cubren los estudios considerados y a partir de ahí se extrapola para el resto de la serie – haciendo uso de la pendiente anual φ – y se aplica este coeficiente a las estimaciones oficiales de población P . El resultado es el valor agregado de generación de residuos sólidos T .

Comparación de serie de datos del SCAE con serie de datos observados por entidades oficiales

En esta etapa, los datos estimados de la regionalización del PIB de los diferentes sectores fueron traducidos a recursos ambientales consumidos por cada sector. La regionalización de la actividad económica en las dimensiones ambientales recogidas por el SCAE resulta muy directa:

- Los impactos ambientales y consumos atribuibles a los consumos intermedios son repartidos en función directa de la participación de la actividad económica que les da origen en cada territorio; y
- Los impactos atribuibles al consumo final y formación de capital fijo son atribuidos en relación con el PIB territorial.

Para comparar los datos obtenidos mediante entidades oficiales con los obtenidos a través de la regionalización del SCAE, se generó gráficas con series temporales.

Comparación de consumo de recursos de Guatemala con el consumo de recursos en megaciudades del mundo

La figura 2, muestra los porcentajes de población, PIB, desechos sólidos, uso de energía, energía eléctrica y de agua en las megaciudades del mundo según el estudio de Kennedy et al. (2015). Los valores

observados en el departamento de Guatemala fueron calculados con relación a la población del país y los de las megaciudades con relación a la población. Ambos sets de datos fueron comparados.

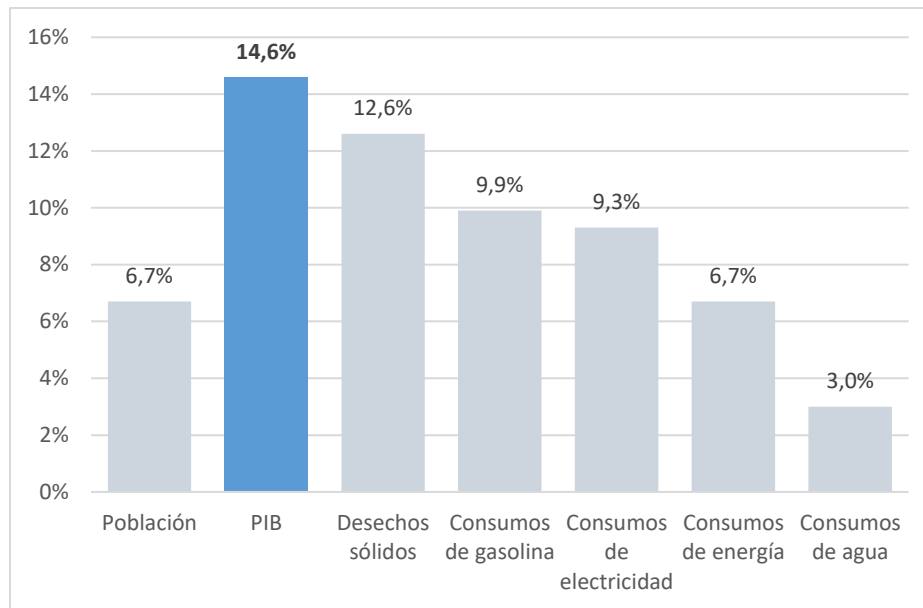


Figura 2 – Consumo de recursos de las megaciudades con relación a los valores de consumo mundial. Fuente: Kennedy et al. (2015).

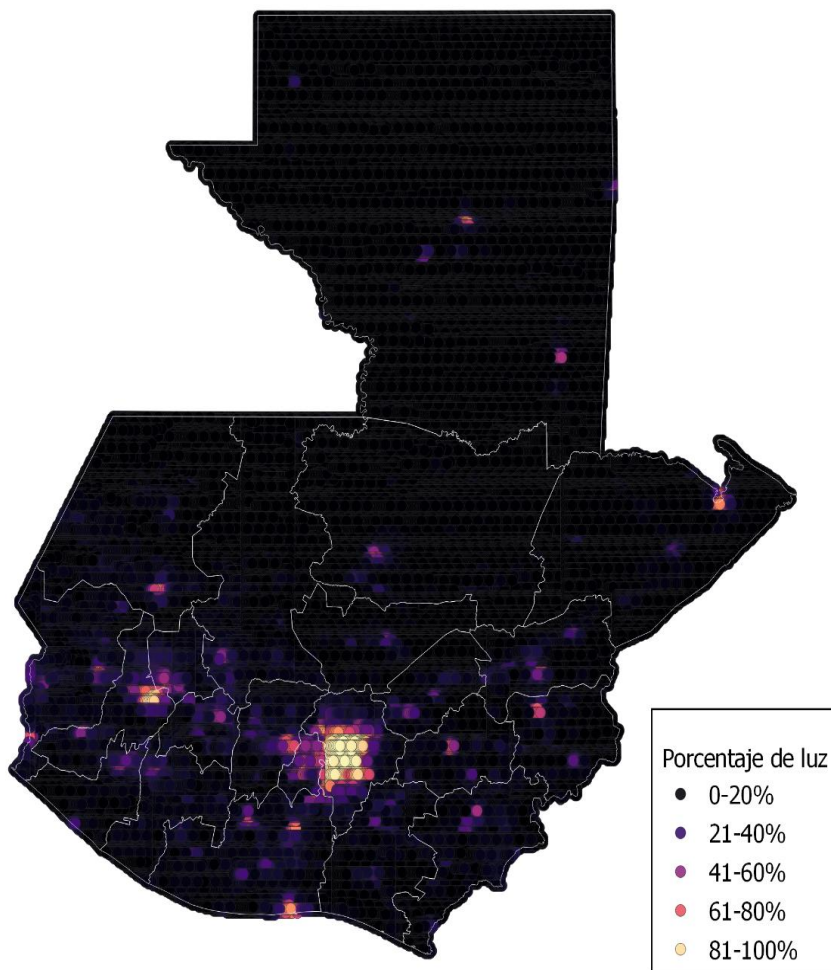
Resultados

Obtención de datos a partir de la regionalización de las cuentas nacionales y ambientales y de datos observados

La figura 3 muestra el mapa de luces nocturnas, utilizado para estimar las proporciones de contribución al PIB de los sectores no agrícolas de cada departamento. La suma de luces nocturnas fue convertida a porcentajes de luz dividiendo la suma de luces de los departamentos dentro del total nacional. La suma total de luz (SL) por departamento, su porcentaje de representación a nivel nacional, y lo que esto representa en términos de PIB para los sectores no agrícolas en 2010, se presenta en la tabla 1. El mismo procedimiento se utilizó para el año 2020.

Las cantidades y porcentajes de suelo agrícola permitieron estimar las aportaciones al PIB de este sector por departamento. El PIB total y por sector económico atribuido a cada departamento en base a la emisión de luces nocturnas y a los estudios de uso del suelo para el año 2020, se presenta en la tabla 2.

Intensidad de luces nocturnas (Nighttime Lights) por departamento de la República de Guatemala, año 2010



Elaborado por: Paulina Reyes
Sistema de Coordenadas Geográficas WGS 84
Escala 1:2905792
Fuente: Imágen satelital de Nighttime Lights de Defense Meteorological
Satellite Program Operational Linescan System (DMSP-OLS) de 2010;
Mapa de departamentos de Guatemala de IGN
Guatemala, marzo de 2023

Figura 3 – Mapa de intensidad de luz nocturna de Guatemala por departamento, año 2010. Elaboración: Instituto de Investigación en Ciencia Ambientales y Tecnología (IARNA) (2023).

Tabla 1 – Luces nocturnas totales por departamento de Guatemala, año 2010

Departamento	Suma de luces (SL)	Porcentaje SL respecto al país	PIB de los sectores no agrícolas
Alta Verapaz	1,357	1.2%	3,483.46
Baja Verapaz	357	0.3%	870.87
Chimaltenango	3,809	3.3%	9,579.53
Chiquimula	1,825	1.6%	4,644.62
El Progreso	1,158	1.0%	2,902.89
Escuintla	9,194	7.9%	22,932.81
Guatemala	49,940	43.0%	124,824.15
Huehuetenango	2,993	2.6%	7,547.51
Izabal	2,346	2.0%	5,805.77
Jalapa	1,345	1.2%	3,483.46
Jutiapa	2,118	1.8%	5,225.20
Petén	2,929	2.5%	7,257.22
Quetzaltenango	9,872	8.5%	24,674.54
Quiché	1,079	0.9%	2,612.60
Retalhuleu	1,936	1.7%	4,934.91
Sacatepéquez	8,845	7.6%	22,061.94
San Marcos	3,581	3.1%	8,998.95
Santa Rosa	1,135	1.0%	2,902.89
Sololá	1,774	1.5%	4,354.33
Suchitepéquez	1,504	1.3%	3,773.75
Totonicapán	4,497	3.9%	11,321.26
Zacapa	2,645	2.3%	6,676.64
Total	116,239	100.0%	290,289

Tabla 2 – Estimaciones de contribución departamental al PIB por sector económico, en millones de quetzales del año 2020.

Departamentos	PIB total	PIB Agrícola	PIB por comercio y servicios	PIB por construcción	PIB Industrial	PIB por minería	PIB por transporte y comunicaciones	Impuestos
Alta Verapaz	13,505	8,469	2,895	307	1,320	29	485	355
Baja Verapaz	3,006	1,360	946	100	431	9	159	116
Chimaltenango	9,618	2,422	4,137	438	1,886	41	693	507
Chiquimula	7,617	2,082	3,182	337	1,451	32	533	390
El Progreso	4,134	363	2,168	230	988	22	363	266
Escuintla	32,504	4,941	15,845	1,679	7,224	159	2,656	1,942
Guatemala	328,922	3,604	187,020	19,816	85,263	1,875	31,344	22,916
Huehuetenango	20,041	2,687	9,977	1,057	4,548	100	1,672	1,222
Izabal	17,475	3,948	7,776	824	3,545	78	1,303	953
Jalapa	4,452	1,008	1,980	210	903	20	332	243
Jutiapa	5,911	1,274	2,666	282	1,215	27	447	327
Peten	22,498	10,607	6,836	724	3,117	69	1,146	838
Quetzaltenango	24,018	2,185	12,552	1,330	5,722	126	2,104	1,538
Quiché	9,011	3,280	3,295	349	1,502	33	552	404
Retalhuleu	6,131	1,641	2,581	274	1,177	26	433	316
Sacatepéquez	12,802	487	7,080	750	3,228	71	1,187	868
San Marcos	14,739	2,911	6,800	720	3,100	68	1,140	833
Santa Rosa	5,882	1,535	2,499	265	1,139	25	419	306
Sololá	5,069	702	2,511	266	1,145	25	421	308
Suchitepéquez	7,641	2,604	2,895	307	1,320	29	485	355
Totonicapán	3,750	258	2,007	213	915	20	336	246
Zacapa	6,372	950	3,117	330	1,421	31	522	382
Total general	565,098	59,316	290,766	30,809	132,560	2,916	48,732	35,629

Comparación de los datos de SCAE y de las series observadas de contraste

Energía eléctrica en todos los sectores

Para la energía eléctrica, se observa una brecha de eficiencia creciente en favor de la zona metropolitana (figura 4).

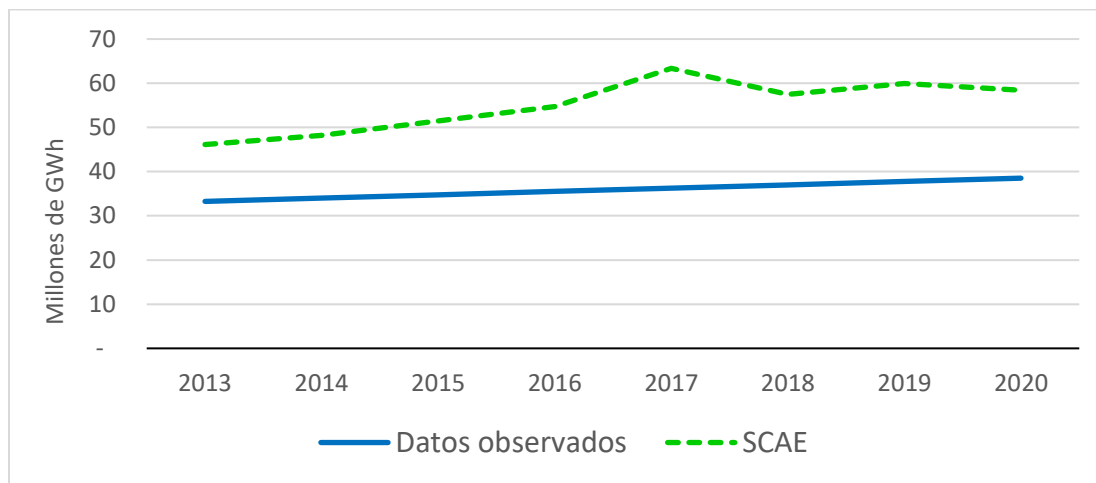


Figura 4 – consumos de energía eléctrica atribuidos a la región metropolitana de Guatemala. Fuente: propia en base a datos oficiales y datos de la regionalización del SCAE.

El consumo de energía eléctrica según los datos observados tuvo un valor de 33.3 millones de GWh en el año 2013 y alcanzó los 38.5 millones de GWh en el año 2020. Sin embargo, la regionalización del SCAE le atribuye al departamento 12.8 millones de GWh más de consumo para el 2013 y 19.8 millones de GWh más para el 2020. Esto representa una eficiencia del 28 % en consumo de recursos de energía eléctrica respecto al resto del país para el 2013 y una eficiencia del 34 %, respecto al promedio nacional para el 2020.

Hidrocarburos en el sector residencial

En el caso de los hidrocarburos, prácticamente no existía ninguna brecha de eficiencia en el año 2013, pero fue abriéndose paulatinamente hacia 2020 (figura 5).

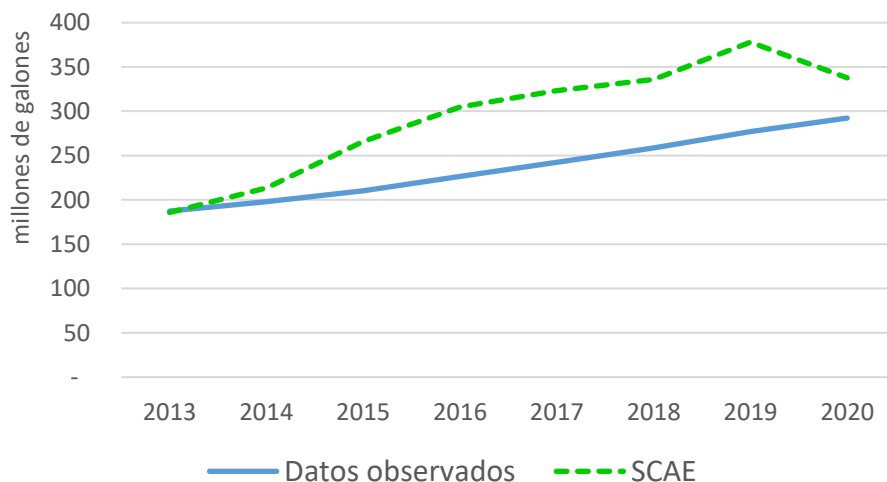


Figura 5 – consumos de gasolina y diésel del sector residencial atribuidos a la Región metropolitana de Guatemala. Fuente: propia en base a datos oficiales y datos de la regionalización del SCAE.

Los consumos de gasolina y diésel para el sector residencial, según los datos observados, mostraron ser de 187.4 millones de galones anuales para el 2013, levemente mayores a los 185.7 millones de galones anuales que se atribuyen según la regionalización del SCAE. Para el 2020, el consumo atribuido según SCAE muestra ser bastante mayor que el consumo observado, siendo el primero igual a 337.7 millones de galones anuales y el segundo igual a 292.3 millones de galones anuales. Es así como, en cuanto al consumo de combustibles, para el 2013 la región metropolitana no mostraba ninguna eficiencia en cuanto al uso a nivel nacional, pero para el 2020, ya se pudo ver una eficiencia de un 13 % con respecto al uso nacional.

Consumo de agua residencial

La gestión del agua residencial parece estar perdiendo eficiencia, pues la brecha entre las series se empieza a cerrar en años recientes (figura 6).

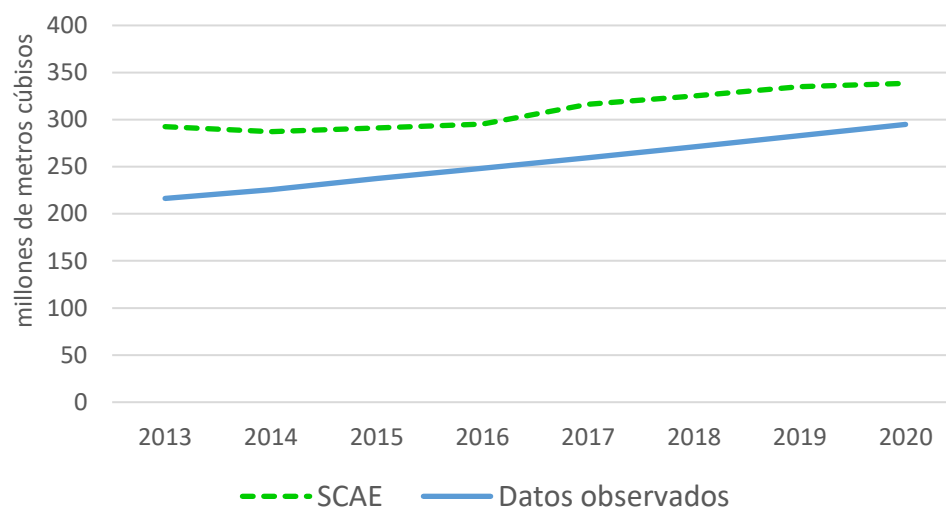


Figura 6 – consumo de agua atribuido a la región metropolitana de Guatemala según SCAE. Fuente: propia en base a datos oficiales y datos de la regionalización del SCAE.

En el año 2013, se observó un consumo de agua para el departamento de Guatemala por 216.3 millones de metros cúbicos anuales; la regionalización del SCAE le atribuía al departamento un total de 292.7 millones de metros cúbicos anuales. Para el año 2020, el consumo de agua observado fue de 294.9 millones de metros cúbicos y el determinado por SCAE fue apenas levemente mayor, en este caso de 338.5 millones de metros cúbicos. Esto representa una eficiencia del 26 % respecto al promedio nacional, en cuanto al consumo del agua. Esta eficiencia había bajado al 13 % para el 2020.

Generación de desechos sólidos en todos los sectores

En cuanto a los desechos sólidos, se observa un patrón de eficiencia en favor de la zona metropolitana que, además, parece creciente en el tiempo (figura 7).

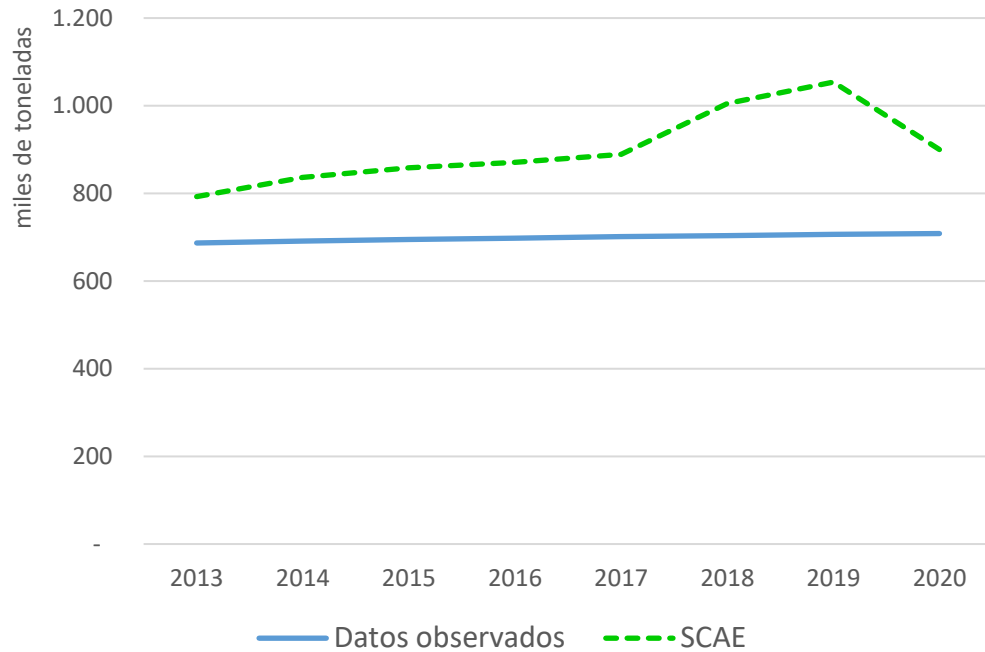


Figura 7 – Generación de desechos sólidos atribuidos a la región metropolitana de Guatemala. Fuente: propia en base a datos oficiales y datos de la regionalización del SCAE.

La cantidad de desechos sólidos producidos por el departamento de Guatemala para el 2013, según los datos observados, fue de 686,826 toneladas por año. El SCAE le atribuyó 792,655 de toneladas anuales a este departamento para el mismo año. Para el 2020, SCAE estimó una generación de 899,879 toneladas por año, y según datos observados, se generó un total de 708,388 toneladas en este año. Para el 2013 esto representa una eficiencia en la generación de desechos de la región metropolitana del 13 % respecto al promedio nacional, la cual aumentó a un 21 % para el 2020.

Ratio de consumo de recursos según regionalización del SCAE y según los datos observados

La figura 8 muestra la comparación de las ratios de consumos observados versus datos del SCAE para varios recursos en el departamento de Guatemala entre los años 2013 a 2020. Se observa una disminución general de la ratio de consumo de electricidad frente a los datos del SCAE, del 80% en 2013 hasta cerca del 60% en 2017. En cuanto a la gasolina y el diésel, la ratio de consumo de combustibles fósiles presenta una tendencia descendente hasta el 2017 punto en el cual empieza aumentar. El patrón del agua aumenta gradualmente del 70% al 90% en 2020. Por último, los residuos residenciales muestran una fluctuación significativa alcanzando su punto más bajo en 2017, con cerca de 65%.

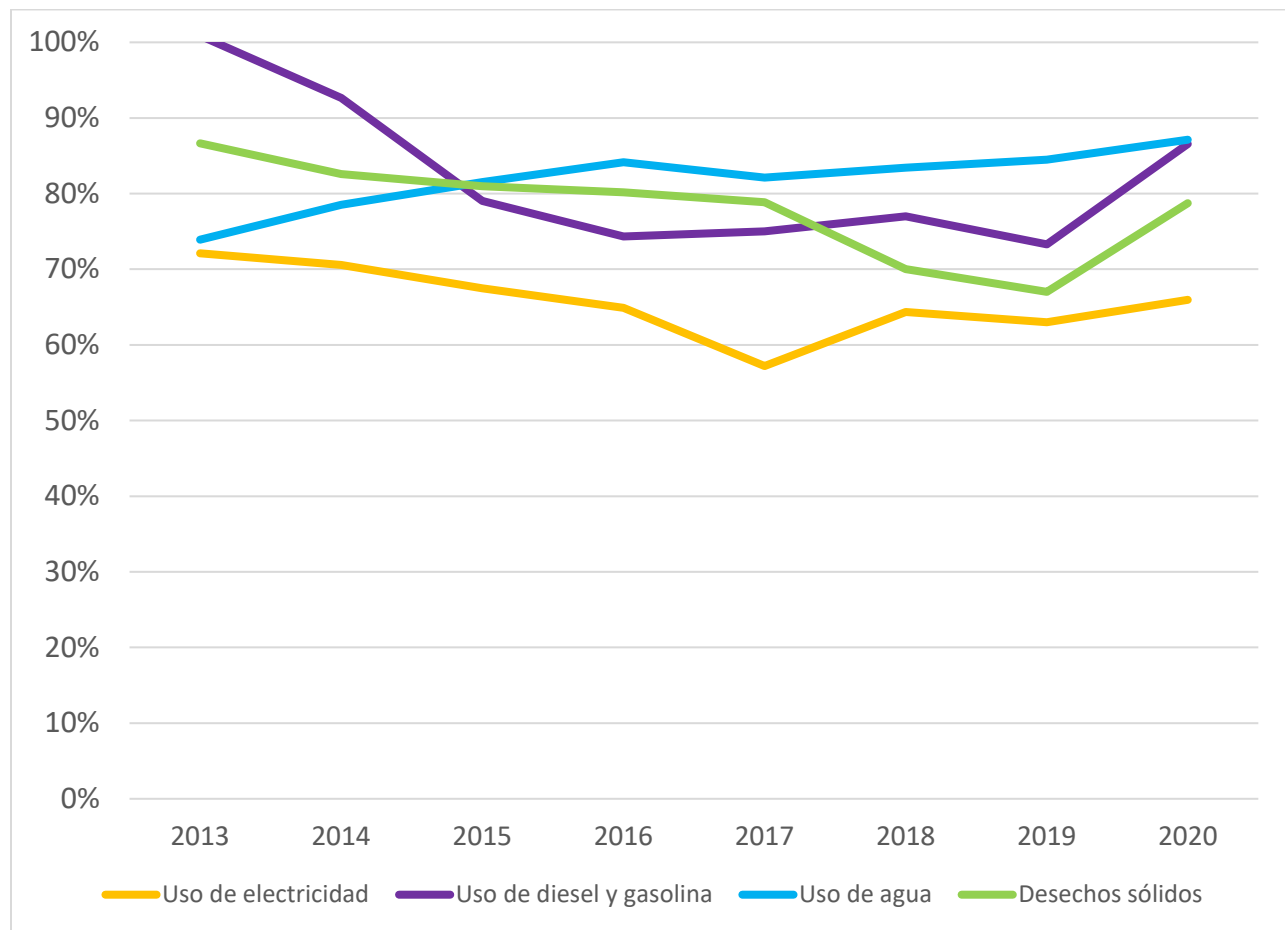


Figura 8 – Ratio de consumos observados versus datos del SCAE en el departamento de Guatemala. Fuente: propia en base a datos oficiales y datos de la regionalización del SCAE

Comparación de la eficiencia de Guatemala frente a las megaciudades del mundo.

La figura 9 muestra la ratio de la producción de PIB, el uso de recursos en las megaciudades y en el departamento de Guatemala. En cuanto al PIB, las megaciudades producen 2.2 veces su participación en la población mundial y Guatemala produce 2.8 veces lo que su población representa a escala nacional. En cuanto al consumo de gasolina, Guatemala utiliza 2 veces lo que representa su población a escala nacional, esto es cercano a lo que utilizan las megaciudades, que es 1.5 veces lo que representa su población a nivel mundial. En cuanto al consumo de electricidad, Guatemala y las megaciudades, utilizan 1.4 veces lo que su población representa, para Guatemala a nivel nacional y para las megaciudades a nivel mundial. En términos de uso del agua, Guatemala utiliza 0.2 veces lo que su población representa a escala nacional y las megaciudades, 0.4 veces lo que su población representa a nivel mundial.

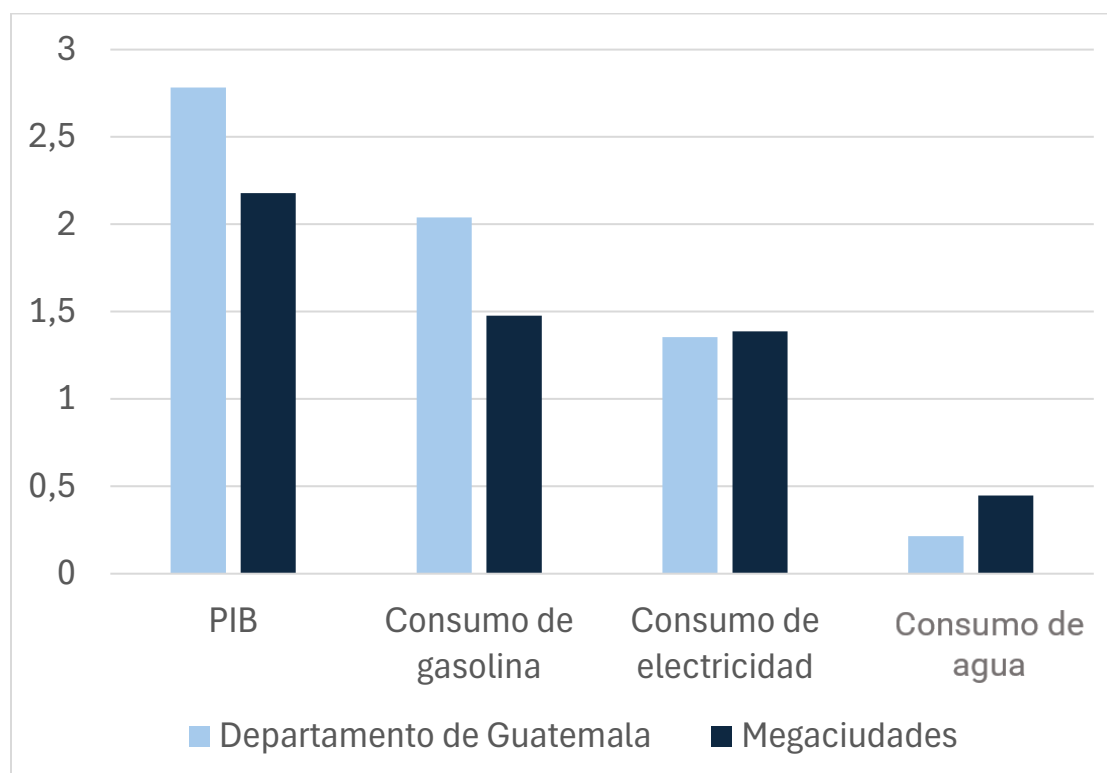


Figura 9 – Ratio de varios indicadores versus población. Fuente propia, con base a datos de Kennedy et. al (2015) y regionalización del SCAE.

Discusión

El presente estudio buscó determinar la eficiencia en el consumo de agua y energía; y en la generación de desechos sólidos, para el departamento de Guatemala. La comparación de dos sets de datos: los reportados por fuentes oficiales y los datos de la regionalización del SCAE, que asumieron una misma eficiencia para la utilización de los recursos a nivel nacional.

En este sentido, si los consumos de recursos estimados a partir de la regionalización del SCAE resultaban ser más altos que los observados en la serie de contraste, ello sería indicativo de que la región metropolitana es más eficiente que el conjunto del país en la gestión económica de ese recurso. Tal situación reflejaría una brecha de eficiencia en favor del área metropolitana del país. Por el contrario, si los resultados mostraban que el uso real de recursos en el departamento de Guatemala es más elevado que los usos según los datos del SCAE, esto significaría que se usan más recursos en la región metropolitana para una producción, que los recursos que esta misma producción requiere en otro departamento. Debido a que los datos fueron recolectados en una serie de tiempo, resulta interesante determinar no solo si esta brecha de eficiencia existe sino también su evolución.

En cuanto a los resultados relacionados con la teledetección espectral de luz nocturna y el mapeo del uso del suelo, el departamento de Guatemala representaba un 43 % de la suma de luces nocturnas del

país en 2010, o 124 millones de quetzales del PIB no agrícola. A este departamento, le seguía el departamento de Quetzaltenango, con un 8.5% de las luces nocturnas, equivalentes a 24 millones de quetzales del PIB no agrícola (tabla 1). Los otros departamentos poseen menores niveles de urbanización y de actividad económica no agrícola. Esto evidencia la enorme disparidad del departamento de Guatemala frente al resto del país.

Tras considerar el PIB del sector agrícola, el departamento de Guatemala sigue siendo el que más contribuye al PIB nacional con un total de 58% para el 2020, lo equivalente a 328 millones de quetzales (tabla 2). Según estas estimaciones, los departamentos que más contribuyen al PIB en el sector agrícola son Petén, seguido por Alta Verapaz y Escuintla. Sin embargo, el PIB agrícola del país en este año, solo representaba el 10.49%, siendo esto una disminución con respecto a 2010, cuando el PIB agrícola representaba un 13.20% del PIB total.

Los resultados muestran que, los consumos de energía eléctrica y generación de desechos sólidos en general y los consumos de gasolina, diésel y agua en el sector residencial, son más eficientes dentro de la zona metropolitana que en el resto del país (figuras 4 a 7). Un mismo consumo de energía eléctrica, agua, gasolina o diésel de los habitantes de la región metropolitana, produce más riqueza que el mismo consumo en otras regiones del país y genera menos desechos.

Las curvas de consumo de energía eléctrica muestran distanciarse en el tiempo (figura 4), o sea, que el área metropolitana está siendo cada vez más eficiente en cuanto a estos consumos.

Así mismo, el consumo de hidrocarburos parece ser cada vez más eficiente, (figura 5), siendo la separación de ambas curvas en el tiempo, menos constante. El consumo de hidrocarburos es particularmente dañino a la salud ambiental y humana. Si bien el área metropolitana los consume de manera más eficiente que el resto del país, esto no significa que no deba buscarse disminuir el consumo de estos, principalmente por medios de transporte eficientes y colectivos.

En cuanto al uso de recursos hídricos, se puede notar que la brecha en eficiencia de consumo de agua se ha ido cerrando en el tiempo (figura 6). El área metropolitana de Guatemala está perdiendo eficiencia en el consumo de este recurso y podría tornarse negativa. Se debe evaluar las políticas de agua. Es necesario regular el uso, tratamiento y captación de agua para evitar la escasez y el agotamiento de las fuentes.

La generación de desechos sólidos (figura 7), también muestra ir ganando eficiencia conforme el tiempo. Sin embargo, no se evaluó el tratamiento o disposición de estos. Esto es esencial para asegurar la sostenibilidad de un territorio. Los hallazgos, permiten cuestionar el uso de recursos energéticos y generación de desechos sólidos a nivel nacional.

Se puede decir que es posible utilizar los datos de la regionalización del SCAE para realizar estudios de metabolismo urbano, considerando que estos podrían tener variaciones, dependiendo de la eficiencia de la ciudad (figura 8).

La figura 1 permite ver que las ciudades del estudio de Kennedy et al. (2015) aglutinan al 6.7 % de la población mundial, pero producen el 14.6 % del PIB. Su impacto sobre el consumo directo de varios recursos

es mayor que su porcentaje de la población, pero menor que su participación en el PIB. En el caso de la energía y el agua, la participación de las megaciudades es incluso menor que su población, mostrando así la eficiencia en el uso de estos recursos.

Al comparar la eficiencia del departamento de Guatemala con la de las megaciudades (figura 9), éste muestra ser más eficiente que las megaciudades en cuanto a la generación de PIB. Sin embargo, en el departamento de Guatemala, se consume dos veces más gasolina que lo que su población representa a escala nacional. Esto supera a las megaciudades que solo consumen 1.5 veces más gasolina que lo que su población representa a nivel mundial. La raíz de la diferencia puede radicar en que las megaciudades por lo general cuentan con sistemas eficientes de transporte público masivo, a diferencia del departamento de Guatemala cuyo transporte público es casi imperceptible y la población depende mayoritariamente del uso de automóviles y motocicletas, que generan un alto congestionamiento de tránsito, y un mayor consumo de combustibles. De las megaciudades, Guatemala podría replicar la expansión del transporte público y el fomento de infraestructura para transportes no motorizados.

En cuanto al uso de energía eléctrica, las megaciudades y Guatemala muestran tener una eficiencia muy similar de 1.4. Guatemala podría seguir los pasos de ciudades como Londres, que ha instalado medidores de eficiencia energética en los edificios y ha apoyado la toma de conciencia en cuanto al ahorro en el consumo de este recurso (Kennedy et al., 2015). O estándares de construcción con una adecuada orientación de los edificios, ventilación, iluminación natural, entre otros.

En el uso del agua, la ratio de 0.2 para Guatemala muestra que hay un mayor consumo de agua que la proporción de la población a nivel nacional. Las megaciudades parecen ser dos veces más eficientes que Guatemala en el uso del agua. De las megaciudades, se puede aprender como Seoul ha desarrollado sistemas de tratamiento de agua que reutilizan este recurso para fines no potables; Tokio ha desarrollado un sistema avanzado de reciclaje de agua y reducción de fugas en la red de distribución (Kennedy et al., 2015). Otras han implementado sistemas de captación de agua de lluvia para riego de áreas verdes y limpieza urbana.

Tanto el estudio de eficiencia en el uso de recursos de las megaciudades, como el estudio de eficiencia en el uso de recursos del área metropolitana de Guatemala, destacan que el uso de recursos ambientales es más eficiente en estas aglomeraciones de personas, que en otras regiones. Esto apunta a que ciudades bien gestionadas son capaces de brindar soluciones al uso racional de recursos naturales.

A pesar de que el departamento de Guatemala muestra ser más eficiente que el resto del territorio en su uso de recursos no es un modelo a seguir, solo que económicamente, hace un uso más eficiente de los recursos ambientales que otros territorios. El país en general enfrenta alta depredación de recursos, baja generación de valor agregado y una legislación ambiental débil. Aún hay desafíos para lograr la sostenibilidad en su área metropolitana.

El área metropolitana de Guatemala aprovecha la eficiencia económica en el uso de recursos, beneficiándose de la aglomeración. Sin embargo, enfrenta desafíos de congestión y sostenibilidad,

especialmente en agua y transporte. Para minimizar impactos, es clave mejorar el transporte público, la gestión hídrica y las políticas ambientales.

Conclusiones

El presente estudio evidenció primero, que es posible regionalizar los datos del SCAE a escala departamental por medio del uso de SIG, utilizando mapas de luces nocturnas y mapas de uso del suelo. Segundo que al comparar estos datos regionalizados con datos observados en el territorio es posible evaluar la eficiencia en el uso de recursos a nivel nacional: los departamentos mostraron eficiencia diferenciada en uso de recursos. Tercero, que es posible integrar los marcos del SCAE y del metabolismo urbano. Cuarto, que, si bien el departamento de Guatemala se beneficia de las bondades de la aglomeración, enfrenta desde ya retos de cogestión urbana

Se debe tomar en cuenta que el presente estudio no hizo un análisis completo de metabolismo urbano, en tanto que únicamente se estudió ya sea los consumos o las salidas de un mismo recurso. Por ejemplo, no se estudió las salidas de agua y su tratamiento posterior a su descarga. Ni se estudió los consumos de recursos como alimentos o materiales que generan los desechos analizados. Sin embargo, la metodología desarrollada muestra que esto sería posible para obtener datos completos del metabolismo de una ciudad.

Una de las limitantes encontradas fue la falta de datos oficiales para todos los años de estudio, lo que implicó la necesidad de recurrir a estimaciones. Otra de las limitantes del presente estudio, es que los datos utilizados, reflejan principalmente, los procesos macroeconómicos de la ciudad. Para entender datos más complejos y de distintos grupos socioeconómicos se requerirían datos de encuestas. Esto ayudaría a visibilizar a una importante parte de la población excluida de los datos macroeconómicos y del desarrollo urbano.

Las líneas de trabajo a futuro que se abren con el presente estudio son primero la posibilidad de hacer estudios de metabolismo urbano completos usando datos del SCAE. Segundo, dado que los datos del SCAE se recogen para una gran cantidad de países a nivel mundial, sería posible generar una comparación entre diversos países. Tercero, la evaluación de las magnitudes de las brechas de eficiencia en relación con las tendencias establecidas por las megaciudades. Por último, qué políticas se requieren en Guatemala para mejorar la eficiencia en el uso de recursos y generación de desechos a futuro.

Los estudios de metabolismo urbano y su posterior traducción en políticas públicas que promuevan un menor consumo de recursos y un tratamiento circular de los mismos, es clave para maximizar el aprovechamiento de recursos naturales. Es así como la urbanización ofrece la posibilidad de contribuir a la sostenibilidad ambiental a un nivel macro y de sobrepasar los obstáculos que se enfrentan en relación con ciertos recursos específicos.

Declaración de disponibilidad de datos

El conjunto de datos que respalda los resultados de este artículo está disponible en SciELO DATA y se puede acceder a él en <https://doi.org/10.48331/SCIELODATA.SW4DXN>

Bibliography

- Banco de Guatemala. (2014). Actualización del Directorio Nacional de Empresas y sus Locales 2013 (DINEL 2013) Índice. Retrieved from https://www.banguat.gob.gt/Publica/DINEL/Informe_Dinel_2013.pdf
- Banco de Guatemala. (2019). *Cuentas Nacionales de Guatemala*. Guatemala: Banco de Guatemala.
- Brinkman, J. C. (2016). Congestion, agglomeration, and the structure of cities. *Journal of Urban Economics*, vol. 94, 13-31.
- Cao, C., Zhang, B., Xia, F., & Bai, Y. (2022). Exploring VIIRS Night Light Long-Term Time Series with CNN/SI for Urban Change Detection and Aerosol Monitoring. *Remote Sensing*, 14(13), 3126. doi: <https://doi.org/10.3390/rs14133126>
- Facchini, A., Mele, R., & Caldarelli, G. (2021). The Urban Metabolism of Lima: Perspectives and Policy Indications for GHG Emission Reductions. *Frontiers in Sustainable Cities*, 2(February), 1-8. <https://doi.org/10.3389/frsc.2020.00040>
- Fundación para la Conservación del Agua de la Región Metropolitana de Guatemala -(2022) *Informe del Estado del Agua de la Región Metropolitana de Guatemala 2022: El Agua Nos Une*. <https://funcagua.org.gt>
- Gebara, I. (1999). *Longing for running water: Ecofeminism and liberation*. Fortress Press.
- Ghosh, T., Powell, R., Elvidge, C., Baugh, K., Sutton, P., & Anderson, S. (2010). Shedding Light on the Global Distribution of Economic Activity. *The Open Geography Journal*, 3, 148-161.
- González, B. (2023). Los desechos sólidos en la Ciudad de Guatemala. Retrieved from <https://investigacionparatodos.usac.edu.gt/articulos-principales/item/25-desechos-sólidos>
- IARNA-URL. (2017). *Perfil Ambiental de Guatemala*.
- Instituto Nacional de Estadística (INE). (2014). *Encuesta Nacional de Condiciones de Vida*.
- Instituto Nacional de Estadística (INE). (2019). *XII Censo Nacional de Población y VII Censo Nacional de Vivienda*. Guatemala. Retrieved from <https://censopoblacion.gt>
- Kennedy, C. A., Stewart, I., Facchini, A., Cersosimo, I., Mele, R., Chen, B., Uda, M., Kansal, A., Chiu, A., Kim, K. G., Dubeux, C., La Rovere, E. L., Cunha, B., Pincetl, S., Keirstead, J., Barles, S., Pusaka, S., Gunawan, J., Adegbile, M., ... Sahin, A. D. (2015). Energy and material flows of megacities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(19), 5985-5990. <https://doi.org/10.1073/pnas.1504315112>
- Lungo, M., & Habana, L. (2001). Expansión de las ciudades en Centroamérica y generación de riesgos urbanos. *Realidad*, 79.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAGA), & Dirección de Información, G. ca, E. y G. de R. (DIGEGR). (2021). *Determinación de la Cobertura Vegetal y Uso de la Tierra a escala 1: 50,000 de la República de Guatemala, Año 2020*.
- Mosquera, V. (n.d.). Contaminación Serie Perfil Ambiental. *En prensa*.

- Musango, J. K., Currie, P., & Robinson, B. (2017). Urban Metabolism for Resource-Efficient Cities: from theory to implementation. *Paris: UN Environment*, 1–39. Retrieved from <https://resourceefficientcities.org/wp-content/uploads/2017/09/Urban-Metabolism-for-Resource-Efficient-Cities.pdf>
- Naciones Unidas, Unión Europea, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Fondo Monetario Internacional, Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, & Banco Mundial. (2014). *System of Environmental-Economic Accounting 2012: Central Framework*. International Monetary Fund.
- Newman, P. W. G. (1999). Sustainability and cities: extending the metabolism model. *Landscape and Urban Planning*, 44, 219–226.
- Pineda, P. (2022). *Biodiversidad Serie Perfil Ambiental de Guatemala* (Cara Parens, Ed.). Universidad Rafael Landívar. www.url.edu.gt
- Universidad Rafael Landívar. (2003). *Generación y manejo de desechos sólidos en Guatemala*.
- Voukkali, I., & Zorpas, A. A. (2022). Evaluation of urban metabolism assessment methods through SWOT analysis and analytical hierarchy process. *Science of the Total Environment*, 807, 150700. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150700>
- Wolman, A. (1965). The metabolism of cities. *Scientific American*, 213(3), 179–190.
-

Editor responsável: Luis Alberto Salinas Arreortua

Recebido: 28-Oct-2024

Aprovado: 26-May-2025