

Eficiencia técnica industrial y el agua como insumo para algunas ciudades de México, 2003-2018

Industrial technical efficiency and water as input for some cities in México 2003-2018

MARITZA ARELI VELÁZQUEZ-VILLALPANDO*,  <https://orcid.org/0000-0002-9767-8197>
Centro de Investigación y Docencia Económicas, México, maritza.velazquez@cide.edu

S. IVVAN VALDEZ,  <https://orcid.org/0000-0002-5996-992X>
Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, México, svaldez@centrogeo.edu.mx

*Autora de correspondencia

Abstract

This research analyzes technical efficiency for industry, considering concessioned water among production inputs. For three large cities and the Bajío region, economic variables such as added value and employment are also included. The goal is to provide evidence on metropolitan technical efficiency, by using a methodology called stochastic frontiers. The main results indicate that, in the period studied, average efficiency was 80%. This percentage has been decreasing, although the larger the city, the more efficient its water consumption should be.

Keywords: sustainability, technical efficiency, stochastic frontiers, metropolitan areas, industrial water.

Resumen

En esta investigación se analiza la eficiencia técnica para la industria, considerando el agua concesionada entre los insumos de producción; para tres grandes ciudades y el Bajío, también se incluyen variables económicas como el valor agregado y el empleo. El objetivo es aportar evidencia sobre la eficiencia técnica metropolitana, para lo cual se utiliza una metodología denominada *fronteras estocásticas*. Los principales resultados indican que, en el periodo estudiado, la eficiencia promedio fue de 80%. Este porcentaje ha ido disminuyendo, aunque, cuanto mayor sea el tamaño de la ciudad, más eficiente debe ser su consumo de agua.

Palabras clave: sostenibilidad, eficiencia técnica, fronteras estocásticas, zonas metropolitanas, agua industrial.

Recepción: 5 de agosto de 2022 / Aceptación: 19 de diciembre de 2023 / Publicación: 11 de diciembre de 2025



Esta obra está protegida bajo la
Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-Sin
Derivadas 4.0 Internacional



CÓMO CITAR: Velázquez-Villalpando, Maritza Areli y Valdez, S. Ivvan (2025). Eficiencia técnica industrial y el agua como insumo para algunas ciudades de México, 2003-2018. *Economía, Sociedad y Territorio*, 25: e2103. <http://dx.doi.org/10.22136/est20252103>

Introducción

Las zonas metropolitanas son espacios de gran relevancia económica y social por el volumen de capital y población que concentran. Sin embargo, también son espacios que pueden resultar insostenibles a largo plazo (Fernández Güell y Cuadrado Roura, 2005), debido a que, en algunas ciudades de México, los recursos naturales son cada vez más limitados proporcionalmente al crecimiento de la población (Velázquez-Villalpando y Valdez Peña, 2022). Por esa razón, actualmente se tiene una gran necesidad de realizar estudios que relacionen la dinámica económica con el impacto ambiental de las ciudades, para poder identificar e incentivar a las zonas metropolitanas de acuerdo con su vocación económica e industrial, pero sin comprometer su sostenibilidad en el largo plazo, pues las actividades económicas, en la escala estatal o metropolitana, operan con diferentes insumos o tecnología y, a su vez, registran diferentes niveles de consumo de agua (Neme Castillo *et al.*, 2021).

En este artículo se analiza la eficiencia técnica en la industria considerando el agua como un insumo en el proceso productivo para las grandes ciudades de México y del Bajío. Como herramienta metodológica, se aborda el tema desde un modelo de fronteras estocásticas, utilizando datos económicos y el volumen de agua concesionado en las zonas metropolitanas. El propósito de la investigación es desarrollar nuevos indicadores que reflejen la realidad de las ciudades e incorporar variables poco exploradas, como las concesiones de agua por tipo de uso consuntivo, lo que da como resultado un análisis de eficiencia técnica a nivel metropolitano.

El artículo está integrado por cuatro secciones: la primera está dedicada al marco teórico-referencial, en el que se discuten aspectos como la relación entre las zonas metropolitanas y la sostenibilidad, así como el consumo de agua industrial en dichos espacios. Además, se reconoce el porqué es importante analizar las ciudades con esta perspectiva y se aborda teóricamente el tema de la eficiencia técnica, la ecoeficiencia y la metodología de fronteras estocásticas, como una herramienta para entender más la sostenibilidad en las ciudades.

La segunda parte se refiere a la metodología, en la que se explica y desarrolla el modelo empírico, se describen las variables, las pruebas preliminares y el *software* utilizado. La tercera parte está dedicada al análisis de resultados, se comparan las zonas metropolitanas de acuerdo con un *ranking* de eficiencia generado gracias al modelo econométrico; también se comparan los resultados de manera gráfica, identificando la evolución de la eficiencia en el tiempo y las diferencias interregionales. Finalmente, en el último apartado se exponen las conclusiones generales obtenidas de esta investigación.

1. Marco teórico-referencial

1.1. *Las zonas metropolitanas y la sostenibilidad*

Estudiar las ciudades muchas veces significa reconocer estos espacios como un símbolo de oportunidades para el progreso cultural y económico (De Alba, 2016). Actualmente las ciudades, representadas en su mayoría por Zonas Metropolitanas (ZM) o metrópolis, se consideran regiones donde se impulsa el desarrollo social y el empleo, así como el progreso industrial y tecnológico (Garrocho *et al.*, 2014). A nivel mundial, desempeñan un papel fundamental, y son consideradas motores de desarrollo (Cabrero Mendoza, 2009; Trejo-Nieto, 2013; González Arellano y Larralde Corona, 2019) y detonantes del crecimiento económico; sin embargo, en los últimos años, se ha cuestionado los problemas ambientales y de sostenibilidad que implican las grandes urbes, especialmente las áreas metropolitanas (Fernández Güell y Cuadrado Roura, 2005).

Aunque no hay un concepto que defina concretamente a las zonas metropolitanas, hay rasgos que las distinguen: son aglomeraciones humanas de determinado tamaño y densidad de población (Tagle Zamora, 2016); y se asientan en un espacio geográfico con el fin de desarrollar sus funciones sociales, económicas y territoriales. Desde esta perspectiva, los recursos naturales se toman como insumos para cumplir esas funciones y procesos (Aguilar Benítez, 2019). Las metrópolis han sido definidas como reagrupamientos de población que no producen por sí mismos sus medios de subsistencia alimentaria (Antier, 2005) y que no son autosuficientes en términos energéticos y, en muchos casos, hídricos (Ugalde, 2013). Entonces, las zonas metropolitanas además requieren una creciente y sostenida demanda de recursos naturales para garantizar el desarrollo de sus actividades socioeconómicas (Tagle Zamora, 2016).

El crecimiento de las ciudades exige cada vez más medios materiales (transporte, infraestructura, agua y energía), así como una transformación del medio físico para satisfacer sus necesidades de desarrollo (Fernández Güell y Cuadrado Roura, 2005). En esa constante dinámica de requerir cada vez más recursos para poder funcionar, las ciudades enfrentan problemas relacionados con el medio ambiente y la escasez de recursos.

Hoy en día los gobiernos necesitan realizar grandes esfuerzos para que las ciudades se conviertan en regiones prósperas, pues al mismo tiempo han sufrido diversos efectos derivados de la urbanización (Méndez, 2016). Por ello, abordar el tema de la sostenibilidad desde el espacio

urbano y metropolitano requiere una reflexión que va desde el concepto, los análisis técnicos, hasta la implementación de políticas públicas que mitiguen los impactos ambientales, con el fin de identificar patrones de consumo que conduzcan a la racionalidad entre el crecimiento económico y el cuidado de los ecosistemas (Corrales y Vera López, 2022). En la actualidad, es común encontrar en la literatura especializada los conceptos de *sustentabilidad*, *sostenibilidad*, *desarrollo sustentable* o *sostenible* de manera indistinta, (Torres-Carral, 2011; Cortés Mura y Peña Reyes, 2015; Chiriboga Méndez, 2012; De las Heras Gutiérrez, *et al.*, 2020) que, aunque en estricto sentido no son sinónimos, todos aluden a la satisfacción de las necesidades de la presente generación sin comprometer las futuras (ONU, 1987).

Para definir el concepto de sostenibilidad se necesita incorporar en la discusión un conjunto de principios que dan forma concreta a las estrategias de desarrollo sustentable. Dicha estrategia necesariamente acompañará múltiples objetivos interrelacionados, reflejando la multidimensionalidad del concepto que abarca los aspectos social/cultural, económico, político, ambiental y moral (Turner, 1993), por ello tendrán que desplegarse múltiples instrumentos, en términos políticos, que atiendan cada aspecto de la sostenibilidad.

Si bien, con base en la literatura referente a la sostenibilidad, se observa que todavía no hay un consenso acerca de su definición (lo que implica que aún existan contradicciones conceptuales y que deba seguir desarrollándose la terminología), se acepta que una ciudad es sostenible cuando logra tener un ambiente saludable, cohesión social, viabilidad económica, ordenamiento territorial y sustentabilidad ambiental (Iracheta Cenecorta, 2007; Chávez Ortiz, 2007).

Desde la perspectiva urbana, la sostenibilidad de las metrópolis depende del manejo más eficiente de los recursos ambientales (Hernández-Rejón *et al.*, 2017). Entre más saturado esté un ecosistema urbano, será menos productivo económica y biológicamente (Quadri de la Torre, 1994), por lo tanto, la supervivencia de la ciudad dependerá del abasto limpio y suficiente de agua, aire y suelo (Hernández-Rejón *et al.*, 2017). El desarrollo urbano sostenible surge como una posible alternativa a la degradación ambiental de las ciudades; se fundamenta en la necesidad de mantener la continuidad en los flujos de energía y materiales, lo que contribuiría a renovar los ciclos de la naturaleza mediante las actividades sociales y económicas (Torres-Carral, 2011). Entonces, las zonas metropolitanas necesitan incluir estrategias de desarrollo sostenible, las cuales consideran el uso eficiente de los recursos naturales, humanos y de capital como la única vía para mantenerse en el largo plazo.

1.2. El agua de uso industrial en las zonas metropolitanas

El agua es un recurso natural finito y compartido (Neme Castillo *et al.*, 2021), de carácter imprescindible en el funcionamiento de las zonas urbanas debido a su impacto multidimensional (Swyngedouw, 2004), que también se relaciona directamente con la calidad de vida de la población. También es indispensable para el desempeño económico (Padrón Cruz y Cantú Martínez, 2009), así como para mantener la salud de la población (Aguilar Benítez y Monforte, 2018).

A nivel global, la crisis hídrica se debe a la ineficiente gestión de dichos recursos (Padrón Cruz y Cantú Martínez, 2009). Ningún territorio puede asegurar su sostenibilidad en el largo plazo, si no cuenta con agua suficiente; desafortunadamente, el crecimiento descontrolado de las ciudades, ha expuesto a una gran proporción de la población al deterioro del agua y de otros recursos naturales (Winchester, 2006).

En el caso específico de México, la oferta de agua en términos absolutos se considera abundante; no obstante, en algunas regiones enfrenta un grave problema de escasez relativa (Conagua, 2013), problema que se agudiza por la incapacidad de abastecer la demanda de agua en algunas cuencas del país, sobre todo en aquellas que suministran el recurso a zonas metropolitanas de gran tamaño (Revollo Fernández *et al.*, 2018). El ejemplo más extremo de escasez se observa en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), que dispone en promedio de 147 m³ por habitante al año, a pesar de que disponer de menos de 1000 m³ ya se considera un parámetro de escasez (Aguilar Benítez, 2019), por lo que para esta metrópoli el uso eficiente de agua es un tema indispensable y urgente de analizar, pues la escasez de agua implica mayores riesgos para la sustentabilidad de una localidad o región y puede representar distorsiones en la toma de decisiones de los agentes económicos, como individuos, familias y empresas (Neme Castillo *et al.*, 2021).

Aunado a lo anterior, además de la escasez de los recursos hídricos, en la actualidad existe una problemática muy compleja en el manejo y dotación de los servicios de agua, en especial, en las grandes ciudades donde se concentran usuarios domésticos e industriales de gran magnitud y que demandan altos volúmenes del recurso hídrico (Breña Puyol y Breña Naranjo, 2009).

Las proyecciones de incremento en la demanda y, por ende, la reducción de la disponibilidad de agua, indican que el sector industrial sería el más afectado, ya que la Ley de Aguas Nacionales vigente prioriza los usos doméstico y público-urbano, seguidos por la ganadería y la

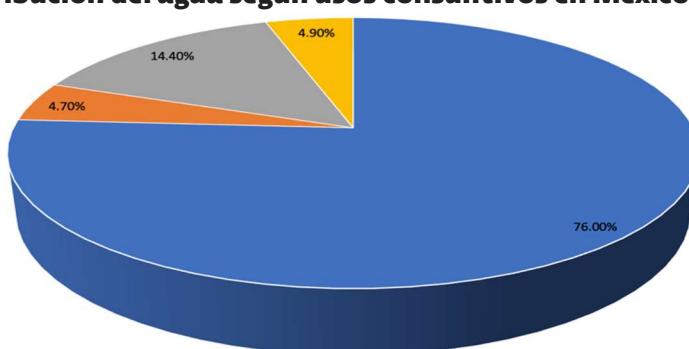
agricultura, y, por último, las actividades industriales (Cortez Lara, 2020; Jacobo-Marín, 2022). Entonces, en una situación de escasez las industrias con alto consumo de agua serían insostenibles.

Sin embargo, la eficiencia y productividad del agua no sólo se hace muy necesaria en el consumo doméstico, sino en todos los usos consuntivos que tiene, incluyendo la industria, un ejemplo de esta situación es el caso de la industria cervecera en Monterrey que analizan Corrales y Vera López (2022).

En cuanto a la industria manufacturera y su relación con el agua, se puede afirmar que todas las actividades económicas que la integran necesitan del vital líquido para su funcionamiento, ya sea para la producción y el mantenimiento de materiales, maquinaria y equipo, desde la elaboración de alimentos y bebidas, hasta el ensamble de productos eléctricos y de autopartes (Carbotecnia, 2023). Además de utilizar el agua como parte del producto final, en algunas industrias también se utiliza para realizar otras actividades que conforman el proceso productivo como: lavar, calentar, refrigerar, generar vapor y transportar substancias o partículas disueltas, entre otras actividades (Unesco, 2017), por lo que el desabasto de este recurso las afectaría gravemente, aunque, en repetidas ocasiones, la distribución espacial y el consumo de agua resultan totalmente insostenibles. Por ende, la escasez hídrica impactaría en la economía de las ciudades que cuentan con industrias de alto consumo de agua, como la alimentaria y la de bebidas, en la que se incluyen la industria refresquera y cervecera.

Según la Conagua, los diferentes usos consuntivos del agua para el 2018 se distribuyen como se muestra en la siguiente gráfica. Cabe mencionar que el uso de energía eléctrica no se incluye la generación hidroeléctrica.

Gráfica 1
Distribución del agua según usos consuntivos en México, 2018



Fuente: elaboración propia, con base en datos de Conagua (2018).

En la gráfica 1 se observa que la mayor proporción de agua se destina a la actividad agrícola, que absorbe el 76% del agua disponible. Hay que señalar que estas actividades se llevan a cabo, principalmente, en zonas no urbanas donde la agricultura extensiva es la actividad económica predominante, por lo que las zonas metropolitanas no contribuyen de manera significativa en este uso.

El siguiente uso que requiere más agua es el abastecimiento público con un 14.4% del agua disponible total. En esta categoría se incluye el agua para consumo de los hogares, la mayor fuente de consumo en las ciudades debido a la gran concentración poblacional que se tiene en las zonas metropolitanas.

Respecto a la utilización en la industria autoabastecida, se observa que representa el 4.9% del agua del consumo total. Si bien no es la de mayor dimensión, a nivel metropolitano sí resulta significativa, sobre todo porque se trata de una actividad económica mayoritariamente ubicada en las ciudades, a diferencia de la agricultura que se ubica más en zonas rurales o fuera de las zonas metropolitanas. En esta delimitación, por uso consuntivo y a nivel metropolitano, se ubica esta propuesta de investigación, debido al menor número de estudios técnicos aplicados con este alcance y delimitación.

1.3. La eficiencia técnica del agua vs. ecoeficiencia

Hoy en día se ha vuelto casi requisito indispensable analizar los recursos naturales con un enfoque de sostenibilidad para encontrar la manera de usarlos de modo más eficiente, incluyendo el agua. En esta sección se aborda el tema de la eficiencia técnica del agua, para lo cual primero se debe definir y distinguir los conceptos de eficiencia técnica y de ecoeficiencia.

El concepto de *eficiencia* se remonta a Farrell (1957), quien lo definió como la habilidad de obtener el resultado máximo posible a partir de un vector de insumos, en otras palabras, la eficiencia mide el desempeño técnico en la mezcla de insumos para alcanzar niveles de producción (Trejo-Nieto, 2013), esto es, la eficiencia se alcanza cuando, a partir de una cantidad determinada de recursos físicos, se obtiene la máxima cantidad posible de producto, o bien, cuando una cantidad de producto se obtiene a partir de la mínima cantidad de insumos físicos (Schmidt y Campion, 2006).

Ahora bien, el concepto de *ecoeficiencia* se emplea para definir la eficiencia con un enfoque de sostenibilidad. Se refiere al uso eficiente y racional de la energía, así como de todos los recursos naturales con beneficios ecológicos y económicos, generando menos desechos y disminuyendo la contaminación ambiental (Advíncula Zeballos *et al.*, 2014), es decir, si entre los insumos productivos

se incluye al menos un recurso natural, estamos hablando de ecoeficiencia. Este término fue definido por primera vez en 1992 por Schmidheiny y el *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD), y se refiere a la creación de más bienes y servicios mientras se usan menos recursos, generando así menos desperdicio o contaminación. Dicho de otra forma, se busca una eficiencia afectando lo menos posible al medio ambiente, es decir, es un proceso de doble alcance.

En la parte aplicada de este trabajo se está considerando un análisis de eficiencia técnica (concepto que será desarrollado con mayor detalle en la siguiente sección), incluyendo un insumo productivo de origen ambiental, como el agua, con el propósito de evaluar aquellas ciudades que logran mayor valor agregado con el menor nivel de consumo del recurso hídrico.

Referente al manejo del agua, la eficiencia técnica en el proceso de producción industrial es una condición necesaria para que la población tenga acceso a este recurso y se pueda asegurar la cantidad, calidad y continuidad, ya que su disponibilidad es esencial para proteger el derecho humano al vital líquido y a la salud (Aguilar Benítez, 2020), especialmente en las zonas metropolitanas, donde hay mayores problemas de escasez. Un adecuado diagnóstico de eficiencia permitiría que las metrópolis aprovechen mejor sus recursos y hagan ajustes que les posibiliten incrementar su nivel de producción (Becerril Torres *et al.*, 2010).

En México son relativamente pocos los trabajos dedicados al análisis de la eficiencia técnica con impacto ambiental, entre ellos destacan, por mencionar algunos, las aportaciones de Aguilar Benítez (2020), quien aplica el análisis de la eficiencia técnica al análisis del agua, y las de Ibarra Armenta *et al.* (2020), quienes analizan la eficiencia energética en entidades de México, ejemplos claros de aplicaciones relacionadas, pues calculan los niveles de eficiencia considerando una variable de impacto ambiental. Otros trabajos a nivel internacional en los que se analiza la eficiencia técnica del agua con un enfoque metodológico similar son Dagar *et al.* (2020) y Laureti *et al.* (2021). Si bien en otros países existe una amplia evidencia técnica con trabajos aplicados, en México no debido a la dificultad de disponer de datos referentes al agua.

1.4. Fronteras estocásticas

Para el análisis de eficiencia, básicamente existen dos metodologías. La primera es una técnica de programación lineal, comúnmente denominada DEA o de Envoltura de Datos, que compara el desempeño

de las unidades de observación. Para este modelo no se necesita determinar la frontera de producción, lo que acarrea ventajas, pero también desventajas, sobre todo cuando hay observaciones atípicas entre las unidades de análisis. Uno de los trabajos efectuado con esta metodología en México es el de Brown Grossman y Domínguez Villalobos (2004). En este documento no se tiene el objetivo de desarrollar la metodología DEA, por lo que sólo se menciona como una referencia.

El segundo enfoque para medir la eficiencia es una técnica paramétrica denominada fronteras estocásticas. Para dicha metodología el concepto de eficiencia se puede ejemplificar a través de una frontera de producción, la cual expresa el monto máximo de producto obtenible, de acuerdo con los insumos y tecnología dados (Aigner *et al.*, 1977).

La importancia de esta metodología radica en que teóricamente se asume que se conoce la función de producción (frontera) y que la unidad de producción (empresa, ciudad o región) es completamente eficiente. En la práctica, la función se desconoce y la evidencia empírica muestra que existen diferencias entre la producción potencial (lo que podría ser) y la observada (lo que realmente es), es decir, el uso de los factores productivos es ineficiente (Becerril Torres *et al.*, 2010), por lo tanto, la eficiencia técnica indica el potencial para el crecimiento económico, manteniendo los insumos y la tecnología constantes, además de que también es una fuente de convergencia (o divergencia) de la productividad entre regiones (Chávez y Fonseca, 2012). De modo que con la metodología de fronteras estocásticas lo que se busca es estimar esa frontera de producción y, a partir de ahí, obtener la eficiencia de las unidades de observación, en este caso, las zonas metropolitanas incluidas. Entre las desventajas de esta metodología se tiene que, al ser un método basado en técnicas econométricas, es susceptible a errores de especificación, además depende completamente de la disponibilidad de datos a los cuales, muchas veces, resulta difícil acceder.

De acuerdo con Aigner *et al.* (1977), quienes parten de las aportaciones previas de Aigner y Chu (1968), Afriat (1972) y Richmond (1974), se asume una función dado el producto máximo posible como una función de ciertos insumos. Para una firma dada i , como a continuación se muestra:

$$y_i = f(x_i; B) \quad (1)$$

Donde y_i es el máximo producto posible que se puede obtener a partir de x_i , un vector de insumos no estocásticos y β es un vector de parámetros desconocidos. Posteriormente, Schmidt (1976) agregó un término de error, generando el siguiente modelo:

$$y_1 = f(x_i; B) + \varepsilon_i \quad i = 1 \dots N \quad (2)$$

Donde $\varepsilon_i \leq 0$. Si el término de error $-\varepsilon_i$ tuviera una distribución exponencial, llevaría a una técnica de programación lineal y si tuviera una distribución seminormal, se trataría de una técnica de programación cuadrática (Aigner *et al.*, 1977), para resolverlo Aigner y Chu (1968) aplicaron máxima verosimilitud.

Para continuar con el modelo, Aigner *et al.* (1977) propusieron la siguiente estructura de error ε_i , al cual se le denomina error compuesto, como a continuación se muestra:

$$\varepsilon_i = u_i + v_i \quad i = 1 \dots N \quad (3)$$

Donde el término de u_i captura la ineficiencia como la falta de producción dada la tecnología, mientras que el término v_i captura los *shocks* estocásticos (Kumbhakar *et al.*, 2022). Ahora con las aportaciones de Battese y Coelli (1992 y 1995), el modelo anterior se adaptó para un panel de datos, quedando el modelo como sigue:

$$Y_{it} = \exp(X_{it}\beta + V_{it} - U_{it}) \quad (4)$$

Donde Y_{it} : denota la producción en la observación ($t=1,2,\dots,T$) para la firma ($i=1,2,\dots,N$).

X_{it} : es un vector de valores conocidos para los insumos de producción y otras variables explicativas para las firmas i en un tiempo t .

β : es un vector de parámetros desconocidos a estimar.

V_{it} : es el término de error aleatorio, con una distribución normal idénticamente distribuida e independiente.

$$V_{it} \sim iidN(0, \sigma_v^2) \quad (5)$$

U_{it} : es la ineficiencia técnica de la producción, la cual se asume con una distribución asimétrica como la seminormal (half-normal distribution).

$$u_{it} \sim iidN^+(\mu, \sigma_u^2) \quad (6)$$

Con estos supuestos el modelo puede ser estimado por máxima verosimilitud. Entonces la eficiencia técnica queda definida como a continuación:

$$TE = \frac{y_i}{\exp(x_i \beta)} = \frac{\exp(x_i \beta_i - u_i \beta_i)}{\exp(x_i \beta_i)} = \exp(-u_i \beta_i) \quad (7)$$

Esta medida de eficiencia está orientada hacia el producto, es decir, será más eficiente aquella unidad de observación que logre más nivel de producción dados los insumos y tecnología, que tomará valores entre 0 y 1, siendo la unidad el valor de completa eficiencia.

De acuerdo con Kumbhakar y Lovell (2000), los modelos de fronteras de producción con datos de panel se pueden obtener a través de tres métodos de estimación: 1) efectos fijos, 2) efectos estocásticos y 3) máxima verosimilitud. Además, para estos modelos se requiere establecer el supuesto sobre la variabilidad de la eficiencia en el tiempo, para lo cual se pueden considerar dos casos: 1) que la eficiencia varíe entre las unidades de observación y se mantenga invariante en el tiempo o 2) que varíe entre las unidades y también en el tiempo (Pérez Cáceres, 2012).

En el presente estudio se analiza la frontera estocástica con datos de panel a través de máxima verosimilitud y con eficiencia variante en el tiempo que es un supuesto menos restrictivo, de acuerdo al modelo de Battese y Coelli (1992).

2. Metodología

2.1. Delimitación geográfica

México es un país que cuenta con 32 entidades federativas. En el 2020 se contabilizaron de manera oficial 74 zonas metropolitanas (Sedatu, Conapo e Inegi, 2018). En este marco de referencia, el presente documento se basa en una muestra de 16 zonas metropolitanas, tres de ellas son las más grandes del país: Valle de México, Guadalajara y Monterrey; las 13 restantes se encuentran en el Bajío,¹ que incluye las entidades de Aguascalientes, Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Querétaro y San Luis Potosí, las cuales se describen en la siguiente tabla 1:

¹ En los espacios urbanos considerados, también se incluye el municipio de San Juan del Río que, si bien no es una zona metropolitana oficialmente declarada por Sedatu, Conapo e Inegi (2018), sí presenta un nivel muy significativo de participación de la industria a nivel estatal. Se incluyó en el estudio por su importancia industrial relativa en el Bajío.

Tabla 1
Zonas metropolitanas consideradas

| <i>Núm.</i> | <i>Zona Metropolitana</i> | <i>Entidad</i> | <i>Población 2020</i> |
|-------------|---------------------------|-------------------------|-----------------------|
| 1 | ZM de Aguascalientes | Aguascalientes | 1,140,916 |
| 2 | ZM de Celaya | Guanajuato | 767,104 |
| 3 | ZM Guanajuato | Guanajuato | 194,500 |
| 4 | ZM León | Guanajuato | 2,139,484 |
| 5 | ZM Morelón - Uriangato | Guanajuato | 108,755 |
| 6 | San Francisco del R. | Guanajuato | 199,308 |
| 7 | ZM Guadalajara | Jalisco | 5,268,642 |
| 8 | ZM Ocotlán | Jalisco | 184,603 |
| 9 | La Piedad - Pénjamo | Michoacán-Guanajuato | 261,450 |
| 10 | ZM Morelia | Michoacán | 988,704 |
| 11 | ZM Zamora | Michoacán | 273,641 |
| 12 | ZM Querétaro | Querétaro | 1,594,212 |
| 13 | ZM San Luis Potosí | San Luis Potosí | 1,243,980 |
| 14 | San Juan del Río | Querétaro | 370,005 |
| 15 | ZM Monterrey | Nuevo León | 5,341,171 |
| 16 | ZM Valle de México | CDMX - Edomex - Hidalgo | 21,815,533 |

Fuente: elaboración propia con datos del Censos de Población y Vivienda (Inegi, 2022b).

Con estas zonas metropolitanas como referencia, considerando todos los municipios que las integran, se agruparon las variables económicas provenientes de los censos económicos del Inegi, como el valor agregado, la formación bruta de capital y el empleo. Para la variable referente al agua, se tomó el volumen de agua acumulado concesionado por Conagua² en los años coincidentes con los censos económicos; además se realizó una integración de las concesiones por municipio hasta conformar la zona metropolitana correspondiente. La descripción de las variables utilizadas se puede analizar mejor en la siguiente sección.

² Para acceder a esta información y haciendo uso de la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública, a petición de los autores se solicitó a Conagua las concesiones otorgadas por empresa, en las que se tiene el volumen concesionado y la localización de éstas, así se integraron manualmente las zonas metropolitanas por año de acuerdo con el volumen de agua concesionado en el sector industrial.

2.2. **Modelo empírico**

2.2.1. Descripción de variables

Para estimar la eficiencia de las zonas metropolitanas, en el modelo de frontera estocástica se consideraron las siguientes variables:

Tabla 2
Variables incluidas en el modelo econométrico

| Variable | Descripción | Abreviación | Fuente de datos |
|---------------------------------------|---|-------------|---------------------------------------|
| Variable dependiente (Y): Producto | Logaritmo del valor Agregado censal bruto* | log(vacbr) | Inegi: Censos Económicos |
| Variables independientes (X): insumos | Logaritmo del personal ocupado (empleo) | log (po) | Inegi: Censos Económicos |
| | Logaritmo de formación bruta de capital fijo* | log(fbkfr) | Inegi: Censos Económicos |
| | Logaritmo de volumen de agua concesionado | log (agua) | Conagua: Volumen de agua concesionada |

Fuente: elaboración propia con base en los censos económicos 2004, 2009, 2014 y 2018 (Inegi, 2022a).

*Con precios de 2013

2.2.2. Ecuación del modelo

A su vez, el panel de datos se construyó con las 16 zonas metropolitanas en estudio para 2003, 2008, 2013 y 2018; las variables del Valor Agregado Censal y la Formación Bruta de Capital fueron deflactados con el deflactor del PIB a precios de 2013. La tabla 2 resume las variables incluidas en el modelo empírico, con las cuales, teniendo en cuenta el modelo teórico y después de varias pruebas preliminares, contrastando dos formas funcionales,³ el modelo empírico queda como a continuación:

$$ly_{it} = \beta_0 + \beta_1 lx1 + \beta_2 lx2 + \beta_3 lx3 + \mu + u_{it} + v_{it} \quad (8)$$

Con la estructura empírica, se realizaron las estimaciones con el *software* R, utilizando la librería *Frontier* 4.1 de Coelli y Henningsen (2013). Los resultados de los dos modelos se muestran a continuación.

³ Se realizaron varios contrastes preliminares. Con base en la literatura consultada, hay dos formas posibles para definir la FPP: con una función translogarítmica y una Cobb-Douglas. Ésta última presenta mejor ajuste.

Tabla 3
Resultados de estimación: Cobb-Douglas y translogarítmica

| A | | | | | | B | | | | | |
|---------------------------------|-----------|------------|---------|----------|-----|---------------------------------|-----------|------------|---------|-----------|-----|
| Cobb-Douglas ⁴ | | | | | | Translogarítmica | | | | | |
| Variable | Estimador | Error Std. | Valor z | Pr(> z) | | Variable | Estimador | Error Std. | valor z | Pr(> z) | |
| Intercepto | -2.046 | 0.652 | -3.140 | 0.002 | ** | Intercepto | -26.747 | 1.068 | -25.038 | < 2.2e-16 | *** |
| L | 0.770 | 0.110 | 7.013 | 0.000 | *** | L | 8.348 | 0.422 | 19.761 | < 2.2e-16 | *** |
| K | 0.264 | 0.081 | 3.252 | 0.001 | ** | K | -4.402 | 0.415 | -10.618 | < 2.2e-16 | *** |
| Agua | 0.098 | 0.052 | 1.894 | 0.058 | * | Agua | 0.085 | 0.133 | 0.635 | 0.526 | |
| σ^2 | 0.473 | 0.383 | 1.235 | 0.217 | | L^2 | -1.116 | 0.095 | -11.790 | < 2.2e-16 | *** |
| γ | 0.743 | 0.269 | 2.759 | 0.006 | ** | K^2 | -0.268 | 0.093 | -2.897 | 0.004 | ** |
| μ | -1.186 | 1.700 | -0.698 | 0.485 | | A^2 | 0.007 | 0.003 | 2.526 | 0.012 | * |
| time | -0.086 | 0.175 | -0.495 | 0.620 | | L^*K | 0.639 | 0.084 | 7.644 | 0.000 | *** |
| | | | | | | L^*A | 0.001 | 0.020 | 0.064 | 0.949 | |
| log likelihood value: -26.23523 | | | | | | K*A | -0.020 | 0.013 | -1.528 | 0.127 | |
| | | | | | | σ^2 | 0.384 | 0.124 | 3.088 | 0.002 | ** |
| | | | | | | γ | 1.000 | 0.001 | 744.498 | < 2.2e-16 | *** |
| | | | | | | μ | -0.064 | 0.282 | -0.228 | 0.820 | |
| | | | | | | time | 0.000 | 1.000 | 0.000 | 1.000 | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | log likelihood value: -15.91904 | | | | | |

Fuente: elaboración y cálculos propios, hechos en el software R (Coelli y Henningsen, 2013).

De acuerdo con las estimaciones para determinar cuál es la forma funcional más adecuada, se realizó el siguiente contraste:

Tabla 4
Prueba de contraste

| Hipótesis nula | Valor λ | Valor crítico | Decisión |
|---|-----------------|---------------|---------------|
| $H_0: \beta_{KL} = \beta_{KA} = \beta_{AL} = \beta_{L^2} = \beta_{K^2} = \beta_{A^2} = 0$ | 20.63 | 11.07 | No se rechaza |

Nota: H_0 : se prefiere el Cobb-Douglas.

Fuente: elaboración propia.

⁴ L y K hacen referencia a las variables trabajo y capital; los parámetros σ^2 = son la varianza de la distribución normal; γ = es la dispersión de v. Si este parámetro es próximo a cero, indicará una total eficiencia en el sistema analizado; μ = variable aleatoria que da cuenta de la ineficiencia técnica. Para mayor detalle consultar Dios Palomares (2002) y Vergara (2006).

El estadístico λ se calcula como:

$$\lambda = -2[\log.(f.verosimilitud_{Ho}) - \log.(f.verosimilitud_{Ha})] \quad (9)$$

El estadístico λ se distribuye como una Chi-cuadrada con grados de libertad igual a parámetros considerados en la hipótesis nula. De acuerdo con el contraste de la tabla 4, no se rechaza la H_0 y se prefiere la forma funcional tipo Cobb-Douglas, por lo que se descarta la forma translogarítmica; además, la mayoría de los parámetros tanto cuadráticos como cruzados referentes a la variable agua, no resultaron significativos, por lo que se confirma que esta forma funcional no es la más adecuada para estimar la eficiencia.

3. Resultados

Para describir los resultados del modelo más adecuado, que es el tipo Cobb-Douglas, se tienen los estimadores del modelo propuesto en el panel A de la tabla 3, donde se pueden apreciar, en primera instancia, las variables de capital (K), empleo (L) y agua que resultaron significativas en un 95%, esto al tener un coeficiente $Pr(>|z|)$ igual o menor que 0.05, identificándolas con algún (*).

En cuanto a los parámetros de varianza, específicamente γ , representan la proporción del error atribuido a la ineficiencia, que es de 74.3%, por lo que en general, el modelo es adecuado para estimar la eficiencia; en el caso de que γ hubiera resultado significativamente igual a cero, se interpreta que el 100 % del error se debe a factores aleatorios y no a la ineficiencia. Por lo que, con el modelo descrito previamente, se obtuvieron los niveles de eficiencia en cada una de las zonas metropolitanas del presente estudio, como se muestran a continuación.

Tabla 5
Resultados de eficiencia

| | <i>2003</i> | <i>2008</i> | <i>2013</i> | <i>2018</i> | |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| ZM Aguascalientes | 0.805 | 0.790 | 0.774 | 0.757 | 0.781 |
| ZM Celaya | 0.749 | 0.731 | 0.711 | 0.690 | 0.720 |
| ZM León | 0.893 | 0.884 | 0.875 | 0.865 | 0.879 |
| ZM San Francisco del R. | 0.941 | 0.936 | 0.931 | 0.925 | 0.933 |
| ZM Guadalajara | 0.915 | 0.908 | 0.900 | 0.892 | 0.904 |
| ZM Ocotlán | 0.571 | 0.544 | 0.515 | 0.486 | 0.529 |
| ZM La Piedad-Pénjamo | 0.867 | 0.856 | 0.845 | 0.833 | 0.850 |

Tabla 5 (Continuación)

| | | | | | |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| ZM Morelia | 0.862 | 0.851 | 0.839 | 0.826 | 0.844 |
| ZM Zamora | 0.920 | 0.913 | 0.906 | 0.898 | 0.909 |
| ZM Querétaro | 0.864 | 0.853 | 0.842 | 0.829 | 0.847 |
| ZM San Luis Potosí | 0.836 | 0.823 | 0.809 | 0.795 | 0.816 |
| ZM San Juan del Rio | 0.799 | NA | 0.767 | 0.750 | 0.772 |
| ZM Monterrey | 0.886 | 0.876 | 0.866 | 0.856 | 0.871 |
| ZM Valle de México | 0.922 | 0.916 | 0.909 | 0.901 | 0.912 |
| | 0.86 | 0.85 | 0.83 | 0.82 | |

Fuente: elaboración propia con datos generados a partir del modelo econométrico tipo Cobb-Douglas.

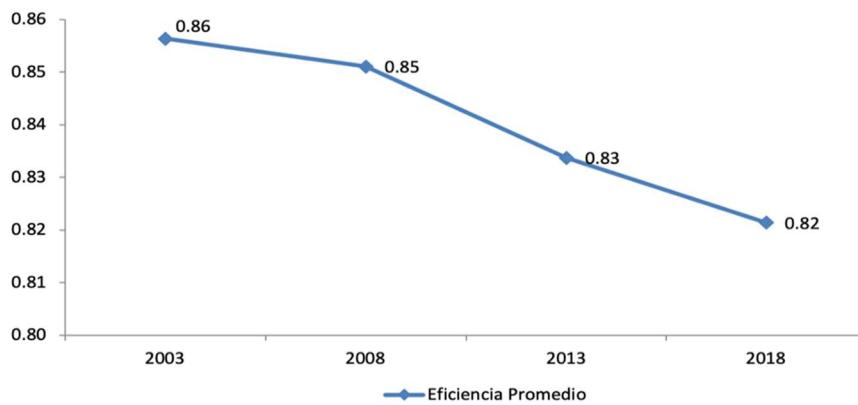
Para analizar adecuadamente los resultados de eficiencia, obtenidos a partir del modelo econométrico, es importante distinguir que al tratarse de una estructura de datos de panel, se puede hacer observaciones a nivel interregional comparando las metrópolis incluidas, así como evaluar los cambios en el tiempo. Cabe mencionar que, debido a que se observaron algunos datos atípicos que afectaban la estimación, se optó por omitir dichos valores del modelo, por lo que quedaron fuera las metrópolis de Guanajuato y Moroleón-Uriangato, caracterizadas por un bajo nivel industrial respecto al resto, y esto mejoró la significancia de las variables.

La primera observación es que el nivel de eficiencia promedio para las ZMs en todo el periodo es de 0.83, es decir, el 83%. En otras palabras, se tiene un nivel de ineficiencia del 17%, lo que significa que hay un desperdicio de recursos en ese mismo porcentaje o que es posible aumentar el producto generado (valor agregado), sin aumentar la cantidad de factores productivos (capital, trabajo y agua) en un 17%.

También se observó que el nivel de eficiencia muestra una tendencia decreciente en el periodo 2003-2018, disminuyendo en promedio un 1% cada cinco años. Esto quiere decir que se produce cada vez menos con el mismo nivel de factores productivos o que se necesita más cantidad de insumos para llegar al mismo nivel de producción, lo que representa un desperdicio de factores, entre ellos, el agua.

En la gráfica 2 se muestra claramente la tendencia a la baja de la eficiencia en las zonas metropolitanas analizadas. En 2003 se tenía un nivel de eficiencia del 86%, lo que indica que estaban a un 14% de la frontera de posibilidades de producción (FPP). Estos indicadores fueron analizados con la intención de reconocer que las zonas metropolitanas no son completamente eficientes, por lo que se requiere efectuar análisis, cambios y políticas que mejoren dicho indicador.

Gráfica 2
Eficiencia promedio 2003-2018

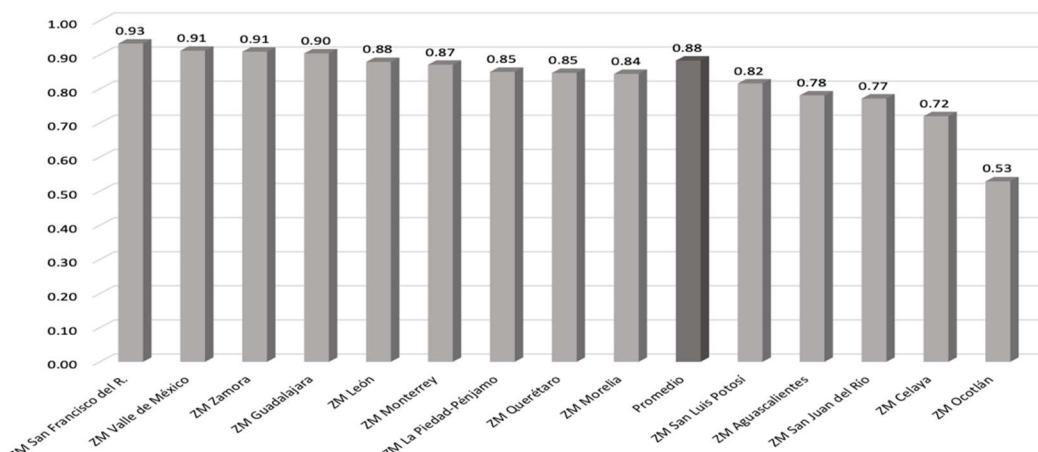


Fuente: elaboración propia con datos obtenidos a partir del modelo econométrico.

Para el siguiente censo económico de 2008, en cambio, el resultado es que en vez de mejorar la eficiencia, aumentó la ineficiencia, es decir, entonces la eficiencia promedio alcanzó el 85%, y así sucesivamente hasta llegar al 2018, cuando se alcanzó un 82% de eficiencia. En total se perdieron cuatro puntos porcentuales con respecto al nivel reportado en 2003.

A nivel regional, cuando se compara la eficiencia de las zonas metropolitanas, se pueden observar las grandes diferencias derivadas inicialmente del tamaño tan desigual que tienen estos espacios urbanos. En la siguiente gráfica se muestra la eficiencia promedio de las zonas metropolitanas analizadas:

Gráfica 3
Eficiencia promedio por zona metropolitana



Fuente: elaboración propia con datos obtenidos a partir del modelo econométrico.

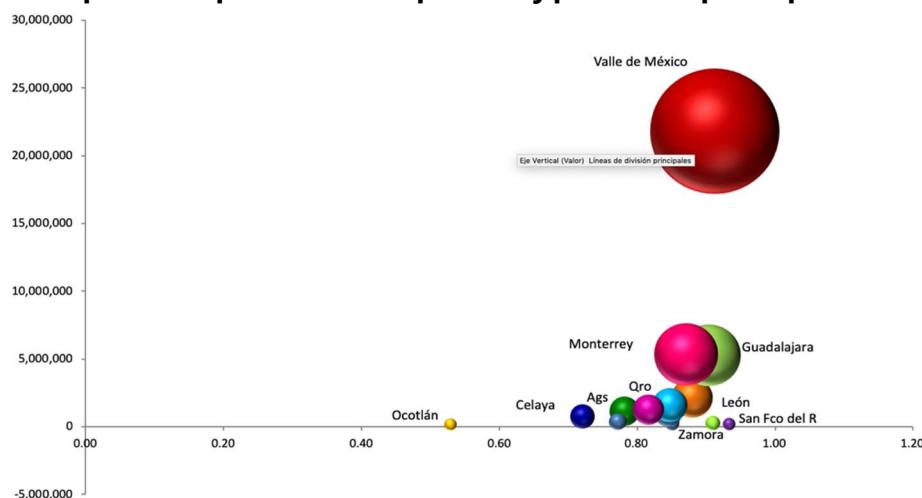
De acuerdo con la gráfica 3, referente al nivel de eficiencia promedio en el periodo 2003-2018, las zonas metropolitanas que obtuvieron una eficiencia por encima del 90% fueron San Francisco del Rincón, Valle de México, Zamora, Guadalajara y León, mientras que Monterrey, La Piedad, Querétaro y Morelia también se situaron por encima del promedio, pero por debajo del 90%, con eficiencia de 85%, aproximadamente.

Entre los hallazgos relevantes está el hecho de que no se puede afirmar que la eficiencia está completamente correlacionada con el tamaño de la metrópoli, pero sí que hay cierta correlación entre estas variables, puesto que San Francisco del Rincón es una de las más pequeñas y resultó ser la más eficiente. Sin embargo, resalta que hay un mayor número de zonas metropolitanas grandes y medianas por encima del promedio y que las menos eficientes resultaron ser pequeñas en relación con el resto, como es el caso de Celaya y Ocotlán, con un 72% y 53% de eficiencia, respectivamente.

Para comparar el nivel de eficiencia de acuerdo con su ponderación por el tamaño de la zona metropolitana, se muestra la siguiente gráfica, en la que visualmente se pueden comparar dichas proporciones.

La gráfica 4 muestra las zonas metropolitanas según su nivel de eficiencia. Entre más alejadas del origen sobre el eje (x) son más eficientes; entre mayor sea el tamaño de la burbuja y más alejadas del origen por el eje (y), son más grandes en población. Entonces, al comparar las metrópolis se observa la gran diferencia de la ZM del Valle de México con respecto al resto; en una posición más modesta se encuentran Guadalajara y Monterrey, que si bien no están cercanas a la dimensión del Valle de México, sí se distinguen del resto perteneciente al Bajío.

Gráfica 4
Eficiencia promedio por zona metropolitana y ponderada por su población



Fuente: elaboración propia con datos obtenidos a partir del modelo econométrico.

En una tercera categoría, después de identificar claramente las tres grandes ciudades del país, se identifican las zonas más importantes del Bajío, que son las capitales de los estados de Aguascalientes, Guanajuato, Michoacán, Querétaro y San Luis Potosí, además de la ZM de León, que, aunque no es la capital de su estado, es de las zonas más sobresalientes de todo el Bajío en eficiencia y otros indicadores. De este grupo únicamente Aguascalientes y San Luis Potosí se situaron por debajo del promedio; el resto se ubicó entre el 85% y 90% de eficiencia.

Finalmente, identificamos las zonas metropolitanas del Bajío más pequeñas, que son ciudades incluidas en esta región, pero que no alcanzan el tamaño y dinamismo que ha mostrado el resto. En este grupo se encuentran las zonas metropolitanas de Celaya, La Piedad, Ocotlán, Zamora, San Francisco del Rincón y San Juan del Río; de este grupo únicamente San Francisco del Rincón y Zamora presentaron un nivel de eficiencia por encima del 90%, el resto se situó con los niveles más bajos de eficiencia respecto a las demás. Ocotlán resultó la menos eficiente con un nivel del 52%.

Por todo lo anterior, independientemente del tamaño de la metrópoli, los resultados de eficiencia indican que no siempre la ciudad más grande es la más eficiente, pero, en este caso, la ZM del Valle de México es por mucho la de mayor tamaño y también una de las que definen la frontera de eficiencia. También se observó que la metrópoli más pequeña del grupo sí es la menos eficiente, en otras palabras, el tamaño no condiciona la eficiencia, pero sí contribuye en su desempeño.

Al interpretar los resultados, pareciera que existe cierta contradicción, pues la ZMVM, por mucho, es la más grande del país y también la que presenta mayor escasez de agua por persona. No obstante, es importante recordar que el objetivo de este artículo es evaluar la eficiencia en la industria, no en el nivel doméstico. Con base en lo anterior, hay dos explicaciones ante esta situación: una es que la industria ya no se localice en el Valle de México puesto que hay más escasez de agua, debido a que esta zona se encuentra saturada y cuenta con una gran concentración espacial de población y de unidades económicas (principalmente de servicios); la otra es que por los mismos motivos se cuide o se restrinjan más las concesiones de agua otorgadas en el Valle de México, por lo tanto, el consumo de agua dedicado a la industria autoabastecida no es el principal causante de la escasez de agua.

Hablar de ineficiencia como contraparte de la eficiencia no se refiere únicamente al desperdicio de agua, sino que engloba la subutilización de todos los factores productivos como el capital, la mano de obra y el agua. Aludir al desperdicio no significa que se esté desperdiciando el recurso hídrico en sentido literal, más bien se están desaprovechando esos recursos. De esto se interpreta que se podría lograr un mayor valor agregado (producto) con los factores dados (insumos).

La metodología de fronteras estocásticas es una herramienta útil para realizar diagnósticos sobre las ciudades, enfocados en analizar la relación entre los insumos utilizados y los productos generados. Asimismo, aporta un parámetro de referencia medible que indica cómo van evolucionando en el tiempo las regiones, lo cual es muy útil para considerar las asimetrías que existen al interior de un país o de una región considerada relativamente homogénea, como el Bajío.

Para terminar esta sección, es importante mencionar que esta investigación representa una aportación al debate con evidencia empírica sobre economía urbana y regional, combinando variables económicas y ambientales. El análisis de la eficiencia a través de fronteras estocásticas, utilizando datos económicos y ambientales, es una aproximación para entender lo que hay detrás de variables más complejas, como la productividad, el crecimiento, el desarrollo metropolitano y el consumo de agua.

No se asume que el tema esté agotado, por el contrario: se espera que siga habiendo aportaciones que enriquezcan la línea de investigación.

Conclusiones

Hoy en día, se suele abordar el tema de la sostenibilidad en la literatura especializada sobre economía urbana y regional, en la que los debates se entrelazan considerando aspectos económicos, sociales y medioambientales. Sin embargo, en la práctica hay una mayor limitación de estudios aplicados a escala regional, una de las razones es que existen menos bases de datos de fácil acceso que incluyan los tres ejes de la sostenibilidad en las mismas dimensiones de tiempo y espacio. Este artículo contribuye a fortalecer esas discusiones y aportar evidencia empírica sobre la eficiencia del agua en el sector industrial, para las tres más grandes zonas metropolitanas del país, incluyendo las del Bajío.

De manera específica, el documento estuvo dedicado a analizar la eficiencia técnica en el consumo de agua en el sector industrial a nivel metropolitano, para lo cual se utilizó una técnica denominada fronteras estocásticas. La intención fue ampliar la metodología y enriquecer el análisis de eficiencia comúnmente abordado sólo desde la perspectiva económica. Aquí se incorporó una variable de naturaleza ambiental para contribuir al entendimiento de la eficiencia metropolitana, con un enfoque de sostenibilidad. Y si bien este concepto va mucho más allá al incluir el aspecto social, aquí únicamente se abordaron dos de las tres dimensiones de la sostenibilidad, la económica y la ambiental.

En cuanto a los principales resultados obtenidos con base en el modelo econométrico, se tiene que en el lapso analizado la eficiencia fue disminuyendo y que, a lo largo de 15 años, se perdieron alrededor de cuatro puntos porcentuales. La eficiencia promedio de todo el periodo fue del 83%, lo que significa que existe subutilización de factores productivos y que es posible aumentar en un 17% el nivel de producto, que es el valor agregado, sin alterar la cantidad de insumos, haciendo referencia al capital, mano de obra y agua.

Respecto a los principales hallazgos a nivel intermetropolitano, se observó que las grandes diferencias de tamaño están en cierta medida relacionadas con la eficiencia obtenida, pues sobresalen las tres grandes metrópolis del país (Valle de México, Guadalajara y Monterrey). Por su parte, las zonas metropolitanas de tamaño medio en el Bajío resultaron con un nivel de eficiencia más moderado o intermedio, como León, Querétaro y Morelia; mientras que del grupo más ineficiente de las ciudades analizadas se encuentran Ocotlán, Celaya y San Juan del Río. Esto es en términos generales, porque también hubo algunos casos opuestos como San Francisco del Rincón, que, a pesar de ser una de las ZMs más pequeñas, resultó ser la más eficiente, y San Luis Potosí que, al ser una ciudad capital de tamaño medio, se situó en el grupo de las menos eficientes. Estos serían los casos en los que el tamaño de la ZM no se relaciona positivamente con el nivel de eficiencia obtenido.

Con esta relación que existe entre tamaño y eficiencia es posible identificar que conforme las zonas metropolitanas siguen aumentando su tamaño, la necesidad de cuidar el agua incrementa pues entre más pequeña la ciudad, existe mayor ineficiencia, subutilización de recursos o mayor disponibilidad del recurso hídrico. Pero conforme las ciudades alcanzan mayor tamaño, se vuelven más eficientes. Mientras que las más pequeñas se quedan rezagadas o simplemente no alcanzan el mismo nivel de eficiencia que las grandes. Esto responde al hecho de que hay mayor eficiencia porque, al ser más escasos, los recursos forzosamente son más restringidos

A partir de lo anterior se puede afirmar que los resultados contribuyen al debate sobre la sostenibilidad aportando evidencia empírica de que las zonas metropolitanas tienden a ser más eficientes mientras más población albergan. También se confirma que es inviable instalar industrias de alta demanda de agua, como la industria alimentaria o de las bebidas, en zonas donde hay poca disponibilidad del recurso hídrico, si bien la industria no es la principal causante de la escasez de agua en las ciudades, al menos en las zonas estudiadas. Habría que seguir explorando las causas de este problema, sobre todo en el consumo habitacional, pero ése es otro tema de investigación.

Para concluir este artículo, huelga decir que deben incorporarse metodologías cuantitativas y cualitativas que aporten una lectura más asertiva de las dinámicas intra e intermetropolitanas

comparables en el tiempo, si se han de integrar las zonas metropolitanas en la sostenibilidad a largo plazo. Sólo así los debates sobre el tema tendrán sustento teórico y empírico, necesario para identificar los desequilibrios, asimetrías, disparidades y, especialmente, retos que enfrentan las regiones al interior de nuestro país, para así proponer políticas públicas más asertivas que se traduzcan en resultados tangibles que favorezcan a cada territorio.

Fuentes consultadas

- Advíncula Zeballos, Orlando; García Junco, Samantha; García Armas, Juvenal; Toribio-Tamayo, Karin Toribio y Meza Contreras, Víctor (2014). Plan de ecoeficiencia en el uso del agua potable y análisis de su calidad en las áreas académicas y administrativas de la Universidad Nacional Agraria la Molina. *Ecología Aplicada*, 13(1), 43-55. <https://goo.su/7coOljg>
- Aigner, Dennis J. y Chu, Shi-Feng (1968). On estimating the industry production function. *American Economic Review*, 58(4), 826-839.
- Aigner, Dennis J.; Lovell, Knox and Schmidt, Peter (1977). Formulation and estimation of stochastic frontier production function models. *Journal of Econometrics*, 6, 21-37. <https://doi.org/c75zfb>
- Afriat, Sydney N. (1972). Efficiency estimation of production function. *International Economic Review*, 13(3), 568-598. <https://doi.org/bkn49z>
- Aguilar Benítez, Ismael (2020). Análisis de eficiencia en los servicios del agua en México con datos de censos económicos. *Realidad, datos y espacio, revista internacional de estadística y geografía*, 11(3), 150-169. <https://n9.cl/huohz>
- Aguilar Benítez, Ismael (2019). El manejo insostenible del agua en ciudades. *Ciencia y Desarrollo*. Conacyt. <https://bit.ly/3pqVWPc>
- Aguilar Benítez, Ismael y Monforte, Gabriela (2018). Servicios públicos del agua, valor público y sostenibilidad, el caso del área metropolitana de Monterrey. *Gestión y Política Pública*, 17(1), 149-179. <https://goo.su/l9d0bq>
- Antier, Gilles (2005). *Les stratégies des grandes métropoles, Enjeux, pouvoirs et aménagement*. Armand Colin.
- Battese, George and Coelli, Timothy J. (1992). Frontier production function, technical efficiency and panel data: With application with paddy farmers in India. *Journal of Productivity Analysis*, 3(1), 153-169. <https://doi.org/djvszd>

- Battese, George and Coelli, Timothy J. (1995). A model for technical inefficiency effects in stochastic frontier production function for panel data. *Empirical Economics*, 20(2), 325-332. <https://doi.org/c7876k>
- Becerril Torres, Oswaldo; Álvarez Ayuso, Inmaculada y Del Moral Barrera, Laura Elena (2010). Eficiencia técnica de las entidades federativas de México. *Economía, Sociedad y Territorio*, 10(33), 485-511. <https://doi.org/pjkw>
- Breña Puyol, Agustín y Breña Naranjo, José Agustín (2009). Problemática del recurso agua en grandes ciudades: zona metropolitana del valle de México. *Contactos* 74, 10-18, <https://bit.ly/434SpUm>
- Brown Grossman, Flor y Domínguez Villalobos, Lilia (2004). Evolución de la productividad en la industria mexicana: una aplicación con el método Malmquist. *Investigación Económica*, 63(249), 75-100. <https://goo.su/wTxz8HM>
- Cabrero Mendoza, Enrique (2009). *Competitividad de las ciudades de México, la nueva agenda urbana*. CIDE-Secretaría de Economía.
- Carbotecnia (2023). *Agua para procesos industriales*. Carbotecnia. <https://bit.ly/3NOMtKL>
- Chávez Ortiz, César Rafael (2007). Sustentabilidad urbana en el ámbito metropolitano: de los conceptos básicos a los instrumentos de política ambiental. En Salvador Moreno Pérez y Gustavo Meixueiro Nájera (Coords.), *El desarrollo metropolitano y la sustentabilidad de las ciudades* (pp. 23-34). Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública.
- Chávez, Juan Carlos y Fonseca, Felipe J. (2012). *Eficiencia técnica y estructural en la industria manufacturera en México: un enfoque regional*, documento de trabajo núm. 2012-03. Banco de México.
- Chiriboga Méndez, Mayra Alejandra (2012). La sostenibilidad y sustentabilidad en los museos, dos enfoques principales: La museología tradicional y la nueva museología. Estudio de caso en dos museos de la provincia de Pichincha. [Tesis de licenciatura. Universidad Tecnológica Equinoccial]. Repositorio UTE. <https://bit.ly/4gJyXou>
- Coelli, Tim and Henningsen, Arne (2013). *Frontier: Stochastic Frontier Analysis. R package* (versión 1.1-0). <https://bit.ly/3JxtNfX>
- Conagua (Comisión Nacional del Agua) (2018). *Estadísticas del agua en México 2018*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://goo.su/HoU8yli>

- Conagua (Comisión Nacional del Agua) (2013). *Estadísticas del agua en México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://goo.su/3TWMSa>
- Cortés Mura, Hernán Gustavo y Peña Reyes, José Ismael (2015). De la sostenibilidad a la sustentabilidad, modelo de desarrollo sustentable, implementación en políticas y proyectos. *Revista de la Escuela de Administración y Negocios*, 78, 40-545. <https://doi.org/pjk4>
- Cortez Lara, Alfonso Andrés (2020). Elementos de conflicto socioambiental: la cervecera Constellation Brands y el agua de Mexicali. *Frontera Norte*, 32. <https://doi.org/pjk2>
- Corrales C., Salvador y Vera López, Juana Isabel (2022). Industrialización del agua y producción de cerveza en Monterrey. *Intersticios Sociales*, 23, 317-347. <https://doi.org/pjkz>
- Dagar, Vishal; Bhattacharjee, Mahua; Faraz, Ahmad; Charan, Amita and Jit, Param (2020). A comparative stochastic frontier analysis for technical efficiency of irrigation in Haryana. *International Journal of Agricultural and Statistical Sciences*, 16(1), 199-209. <https://goo.su/YbnPoW>
- De Alba, Felipe (2016). *El agua en tiempos de incertidumbre. Una propuesta de análisis sobre conflictos hídricos en la metrópolis de México*. Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública. Cámara de Diputados/LXIII Legislatura.
- De las Heras Gutiérrez, Daniel; Adame Martínez, Salvador; Cadena Vargas, Edel Gilberto y Campos Alanís, Juan (2020). Análisis espacial del Índice de Sustentabilidad Ambiental Urbana en la Megalópolis de México. *Investigaciones Geográficas*, 73, 147-169. <https://doi.org/pjv9>
- Dios Palomares, Rafaela (2002). Análisis de interpretación de los parámetros de relación de varianzas en el modelo de frontera estocástica. *Estudios de Economía Aplicada*, 20(2), 365-379. <https://goo.su/6XZxBz>
- Farrell, Michael James (1957). The measurement of productive efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society, 120*(3), 253-28. <https://doi.org/crvgn>
- Fernández Güell, José Miguel y Cuadrado Roura, Juan R. (2005). Las áreas metropolitanas frente al desafío de la competitividad. En Eduardo Rojas, Juan R. Cuadrado Roura y José Miguel Fernández Güell (Eds.), *Gobernar las metrópolis*, (pp. 63-126). Banco Interamericano de Desarrollo.
- García Salazar, Edith (2008). Economía ecológica frente a economía industrial: el caso de la curtiduría industrial en México. *Argumentos. Estudios críticos de la sociedad*, 1(56), 55-71. <https://goo.su/4yZP8T>

- Garrocho, Carlos; Aguilar, Adrián; Brambila, Carlos; Graizboard, Boris y Sobrino, Jaime, (2014). *Hacia una cultura de ciudades sostenibles*. Fondo de Población de las Naciones Unidas.
- González Arellano, Salomón y Lerralde Corona, Adriana Helia (2019). La forma urbana actual de las zonas metropolitanas de México: indicadores y dimensiones morfológicas. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 34(1), 11-42. <https://doi.org/pjwf>
- Hernández-Rejón, Elda Margarita; Adame-Martínez, Salvador y Cadena-Vargas, Edel (2017). Los retos de la sustentabilidad urbana en México. Reflexiones sobre su evaluación a través de la metodología ICES del BID. *Quivera. Revista de Estudios Territoriales*, 19(1), 85-97. <https://goo.su/PLWuU>
- Ibarra Armenta, Cristina Isabel; Becerra-Pérez, Luis Armando and Millán López, Nora Teresa (2020). Energy Efficiency of Mexican states: A Stochastic Production Frontier Approach. *Revista Mexicana de Economía y Finanzas Nueva Época REMEF*, 15(4), 665-683. <https://doi.org/pjwh>
- Inegi (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2022a). Censos Económicos (CE) 2004, 2009, 2014, 2018. Inegi. <https://n9.cl/5x6ru>
- Inegi (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2022b). Censos de Población y Vivienda (CPV) 2004, 2009, 2014, 2019, 2020. Inegi. <https://n9.cl/oosj>
- Iracheta Cenecorta, Alfonso Xavier (2007). Coordinación metropolitana en México: La urgencia de una decisión. En Salvador Moreno Pérez y Gustavo Meixueiro Nájera (Coords.), *El desarrollo metropolitano y la sustentabilidad de las ciudades* (pp. 57-77). Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública.
- Jacobo-Marín, Daniel (2022). Régimen energético, usos del agua y antinomias jurídicas: El caso del fracking en México. *Economía, Sociedad y Territorio*, 22(70), 921-949. <https://doi.org/pjwn>
- Kumbhakar, Subal and Lovell, Knox (2000). *Stochastic frontier analysis*. Cambridge University Press.
- Kumbhakar, Subal; Parmeter, Christopher and Zelenyuk, Valentin (2022). Stochastic Frontier Analysis: Foundations and Advances, I. In Subhash C. Ray, Robert G. Chambers and Subal C. Kumbhakar (Eds.), *Handbook of Production Economics* (pp. 331-370). Springer.
- Laureti, Tiziana; Benedetti, Ilaria and Branca, Giacomo (2021). Water use efficiency and public goods conservation: A spatial stochastic frontier model applied to irrigation in Southern Italy. *Socio-economic Planning Sciences*, 73. <https://doi.org/pjws>

- Méndez, Ricardo (2016). Redes de innovación para promover el desarrollo de ciudades medias. En Juan Antonio Rodríguez, Lorena Álvarez Castañón, Daniel Tagle Zamora y José Luis Coronado Ramírez (Coords.), *Desarrollo desde lo local y dinámicas territoriales* (pp. 39-55). Fontamara-Universidad de Guanajuato.
- Neme Castillo, Omar; Valderrama Santibáñez, Ana Lilia y Chiatchoua, Cesaire (2021). Factores determinantes del consumo productivo de agua y sus efectos en la actividad económica de México. *Economía, Sociedad y Territorio*, 21(66), 505-537. <https://doi.org/pjwt>
- ONU (Organización de las Naciones Unidas) (1987). *Report of the world commission on environment development: Our common future*. <https://acortar.link/wyJ03d>
- Padrón Cruz, Ana Cecilia y Cantú Martínez, Pedro César (2009). El recurso agua en el entorno de las ciudades sustentables. *Cultura científica y tecnológica*, 31, 16-25. <https://goo.su/yT3TcpB>
- Pérez Cáceres, María Concepción (2012). Modelos de frontera estocástica, distribución de la ineficiencia [Tesis doctoral, Universidad de Murcia]. Digitum. <https://bit.ly/3NOmIu0>
- Quadri de la Torre, Gabriel (1994). Sustentabilidad urbana y desigualdad; argumentos de política pública. En Pablo Pascual Moncayo y José Woldenberg (Coords.), *Desarrollo, desigualdad y medio ambiente*. Cal y Arena.
- Revollo Fernández, Daniel Alfredo; Rodríguez-Tapia Lilia y Morales-Novelo, Jorge A. (2018). Valor económico del agua en la industria manufacturera, ubicada en la subregión, Río San Juan, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(5), 218-245. <https://goo.su/w2SQX1>
- Richmond, John (1974). Estimating the efficiency of production. *International Economic Review*, 15(2), 515-521. <https://doi.org/fpg6wb>
- Schmidheiny, Stephan y WBCSD (World Business Council for Sustainable Development) (1992). *Changing course: A global business perspective on development and the environment*. MIT Press.
- Schmidt, Gabriela y Campión, Paulina (2006). Medición de la eficiencia técnica mediante el método de fronteras estocásticas, el caso del sector manufacturero italiano. *Estudios Económicos*, 23(46), 93-126. <https://doi.org/pjwv>
- Schmidt, Peter (1976). On the statistical estimation of parametric frontier production functions. *The Review of Economics and Statistics*, 58(2), 238-239. <https://doi.org/bzcn8z>

- Sedatu, Conapo e Inegi (Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano, Consejo Nacional de Población e Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2018). Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015. Sedatu, Conapo e Inegi. <https://goo.su/TbfYEfT>
- Swyngedouw, Erik (2004). *Social power and the urbanization of water: flows of power*. Oxford University Press.
- Tagle Zamora, Daniel (2016). Discrecionalidad y permisividad, en la gestión del agua en León, Guanajuato: Ausencia del derecho humano al agua y deterioro ambiental. En Juan Antonio Rodríguez, Lorena Álvarez Castaño, Daniel Tagle Zamora y José Luis Coronado Ramírez (Coords.), *Desarrollo desde lo local y dinámicas territoriales* (pp. 39-55). Fontamara-Universidad de Guanajuato.
- Torres-Carral, Guillermo Arturo (2011). Territorialidad y sustentabilidad urbana en la Zona Metropolitana del Valle de México. *Economía, Sociedad y Territorio*, 11(36), 545-591. <https://doi.org/pjww>
- Trejo Nieto, Alejandra (2013). Las economías de las zonas metropolitanas de México en los albores del siglo XXI. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 28(3), 545-591, <http://bit.ly/46Z6WpM>
- Turner, R. Kerry (1993). Sustaintability: principles and practice. En R. K. Turner (Ed.), *Sustainable, enviromental, economics and management*, (pp. 3-36). Belhaven Press.
- Ugalde, Vicente (2013). Hacia una ciudad sostenible en México. En Enrique Cabrero Mendoza (Coord.), *Ciudades mexicanas. Desafíos en concierto* (pp. 248-288). Fondo de Cultura Económica-Consejo Nacional para la Cultura y las Artes.
- Unesco (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura) (2017). *World Aater Assessment Programe*. Unesco. <https://goo.su/VBI7782>
- Velázquez-Villalpando, Maritza Areli y Valdez Peña, Sergio Ivvan (2022). Consumo de agua industrial en el Bajío: un análisis por zona metropolitana 2008-2013. *Relaciones, estudios de Historia y Sociedad*, 43(171), 154-191. <https://doi.org/pjwx>
- Vergara, Marcos (2006). Nota técnica para estimar fronteras estocásticas: una aplicación a la banca chilena. *Estudios de Administración*, 13(2), 47-66. <https://doi.org/pjwz>
- Winchester, Lucy (2006). Desafíos para el desarrollo sostenible de las ciudades en América Latina y el caribe. *Eure*, 32(96), 7-25. <https://doi.org/c76j6h>

Reseñas curriculares

Maritza Areli Velázquez-Villalpando. Doctora en Economía Regional por la Universidad Autónoma de Coahuila. Actualmente es profesora-investigadora titular del Centro de Investigación y Docencia Económicas, A. C. Integrante del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) Nivel I, de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihi). Sus líneas de investigación son economía urbana y regional, desarrollo económico regional, infraestructura y desarrollo. Entre sus más recientes publicaciones se encuentran: en coautoría: Los polos de desarrollo del Corredor Interocéanico y su conectividad carretera a los Centros Urbanos de la Región del Istmo en Emma Regina Morales García de Alba y Crucita Aurora Ken Rodríguez (Coords.) *Procesos urbanos y dinámicas del mercado laboral* (pp. 65-80), Universidad Nacional Autónoma de México (2024); Ecoeficiencia en la industria de los minerales en la región Centro y Bajío. Análisis por zona metropolitana 2008-2018, *Equilibrio Económico*, 19(55), 116-145 (2023); Productividad y consumo de agua industrial en el Bajío: un análisis por zona metropolitana 2008-2013. *Relaciones, historia y sociedad*, 43(17), 154-191 (2023). Correo-e: maritza.velazquez@cide.edu

S. Ivvan Valdez. Doctor y maestro en Ciencias de la Computación, por el Centro de Investigación en Matemáticas, A. C. (Cimat). Actualmente es investigador en México de la Secihi, comisionado al CentroGeo unidad Querétaro. Sus líneas de investigación son cómputo paralelo, simulación y optimización numérica, con aplicaciones a problemas geoespaciales y de ingeniería, tales como el diseño óptimo y el ajuste de modelos en problemas con variables geoespaciales y temporales. Entre sus más recientes publicaciones se encuentran: como coautor: Estimation of peak flow in flood-producing rivers using numerical simulation, geospatial information and evolutionary algorithms. *Revista Internacional de Métodos numéricos en ingeniería*, 40(3), 37 (2024); The Directed Multi-Objective Estimation Distribution Algorithm (D-MOEDA). *Mathematics and Computers in Simulation*, 214, 334-351 (2023); e Improved training of deep convolutional networks via minimum-variance regularized adaptive sampling. *Soft Computing*, 27, 13237-13253 (2023). Correo-e: svaldez@centrogeo.edu.mx