

DOI: 10.24850/j-tyca-2026-04-02

Artículos

Segmentación y caracterización de los operadores de agua y saneamiento en México

Segmentation and characterization of water and sanitation utilities in Mexico

Héctor Camacho¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8679-4002>

Jessica Briseño-Ruiz², ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7663-5000>

¹Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México,
hector_camacho@tlaloc.imta.mx

²Universidad Politécnica del Estado de Morelos, Jiutepec, Morelos, México,
jessica_briseno@tlaloc.imta.mx

Autor para correspondencia: Héctor Camacho,
hector_camacho@tlaloc.imta.mx

Resumen

Este estudio examina la estructura y el desempeño de los organismos operadores de agua potable y saneamiento en México, utilizando datos abiertos del INEGI y técnicas de aprendizaje automático no supervisado. Se aplicó un análisis de componentes principales para identificar las

variables operativas más representativas, seguido de la implementación del algoritmo *K-means*, con el cual se agruparon los organismos operadores en categorías homogéneas según sus características estructurales y operativas. El análisis dio lugar a siete clústeres con características diferenciadas. Los tres primeros clústeres agrupan al 88 % de los organismos, caracterizados por bajos ingresos, limitada infraestructura y ubicación en municipios con muy alta, alta o media marginación. Estos presentan coberturas promedio de entre 72.9 y 82.6 % en agua potable, y entre 69.1 y 76.5 % en drenaje, con ingresos per cápita inferiores a \$325 pesos anuales. Los clústeres 4 y 5 evidencian mejoras en cobertura y eficiencia operativa, con poblaciones atendidas más amplias, mejor infraestructura e ingresos de hasta \$916.96 pesos per cápita. El clúster 6 está integrado principalmente por organismos de tipo estatales, muestra coberturas superiores al 95 % y el doble de ingresos respecto al clúster 5. Por último, el clúster MC, conformado por 20 organismos operadores localizados en urbes de gran escala, presenta los mejores indicadores: coberturas superiores al 97 % e ingresos per cápita promedio anuales de \$1 625 pesos. Los resultados obtenidos permitieron identificar características comunes dentro de cada grupo, proporcionando información valiosa para el diseño de políticas públicas y estrategias de mejora adaptadas a las condiciones específicas de cada segmento.

Palabras clave: servicios públicos, abastecimiento de agua, saneamiento, análisis estadístico, análisis de datos, México.

Abstract

This study examines the structure and performance of Drinking Water and Sanitation Utilities in Mexico, using open data from INEGI and unsupervised Machine Learning techniques. A Principal Component Analysis (PCA) was conducted to identify the most representative operational variables, followed by the implementation of the K-Means clustering algorithm to group the utilities into homogeneous categories based on their structural and operational characteristics. The analysis resulted in seven distinct clusters. The first three clusters encompass 88% of the utilities, characterized by low revenues, limited infrastructure, and location in municipalities with very high, high, or medium levels of marginalization. These utilities exhibit average coverage rates ranging from 72.9 to 82.6 % for drinking water, and from 69.1 to 76.5 % for sewerage, with per capita annual revenues below \$325 pesos. Clusters 4 and 5 demonstrate improvements in both coverage and operational efficiency, serving larger populations, with better infrastructure and per capita revenues reaching up to \$916.96 pesos. Cluster 6, composed mainly of state-level utilities, shows coverage levels above 95% and per capita revenues twice as high as those in Cluster 5. Lastly, the Metropolitan Cluster (MC), consisting of 20 utilities located in large urban areas, presents the best performance indicators, with coverage rates exceeding 97% and average annual per capita revenues of \$1 625 pesos. The results obtained allowed for the identification of common characteristics within each group, providing valuable information for the design of public policies and improvement strategies tailored to the specific conditions of each segment.

Keywords: public utilities, water supply, sanitation, statistical analysis, data analysis, Mexico.

Recibido: 26/06/2025

Aceptado: 01/09/2025

Publicado *ahead of print*: 18/09/2025

Versión final: 01/07/2026

Introducción

El acceso al agua potable y los servicios de saneamiento son pilares para el desarrollo social y económico de un país. En México, la prestación de tales servicios está a cargo de los organismos operadores de agua potable y alcantarillado (OOAPAS), que en su mayoría forman parte de la esfera de gobierno municipal. La capacidad que tienen estas organizaciones para brindar servicios eficientes depende en gran medida de factores como su organización jurídica, el presupuesto disponible, la antigüedad de su personal directivo, así como la cobertura geográfica que abarcan, entre otros.

En la actualidad, la política pública federal que apoya el fortalecimiento de dichas organizaciones segmenta a los prestadores de estos servicios en urbanos y rurales, pero en algunos programas presupuestarios, como el Programa de Agua Potable, Drenaje y Tratamiento (Proagua), esta segmentación se desagrega para los urbanos en cinco grupos de localidades caracterizadas por el número de habitantes, mientras que en los rurales se segmentan en tres grupos de

acuerdo con su condición de marginación o rezago social. Mediante esta clasificación se establecen diversas acciones de respaldo a través de subsidios y aportaciones que en lo general están dirigidos a crear nueva infraestructura, rehabilitar la existente y desarrollar capacidades institucionales. Sin embargo, los organismos operadores presentan heterogeneidades dentro de las mismas clasificaciones, que deben analizarse para mejorar el diseño de las políticas públicas de agua y saneamiento, y considerar que son formas de solucionar problemas complejos de la sociedad; se debe usar el conocimiento disponible (Arellano-Gault & Blanco, 2013) para comprender las problemáticas de los operadores y formular acciones de apoyo con base en nuevas segmentaciones que los agrupen de acuerdo con similitudes obtenidas por un conjunto de variables.

El Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México (CNGMyDT CDMX), elaborado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), proporciona información detallada sobre la distribución, estructura y cobertura de los organismos de agua potable, alcantarillado y saneamiento (OOAPAS) en México. Los datos censales son proporcionados directamente por las entidades municipales responsables de la prestación de estos servicios, lo que los convierte en una fuente fundamental para el análisis y la comprensión del estado del sector (Beltrán-Reyna, 2019). Según el CNGMyDT CDMX de 2023, a nivel nacional se registran 4 169 OOAPAS distribuidos en 2 451 municipios. De estos, el 41.5 % (1 730) corresponde a organismos de tipo comunitario, mientras que el 37.8 % (1,577) es de administraciones municipales. En menor proporción, el 11.4 % (473) está constituido por organismos descentralizados municipales, el 6.2 % (258)

por organismos estatales y el 3.1 % (131) por otras formas jurídicas. Tal distribución evidencia una importante dispersión en la estructura, así como en las capacidades técnicas y financieras de los organismos en México, lo que plantea desafíos significativos en la coordinación interinstitucional, el financiamiento y la eficiencia operativa de los organismos responsables.

El análisis del CNGMyDT CDMX muestra que la cobertura territorial de los OOAPAS en México es heterogénea: el 32.9 % opera solo en la cabecera municipal; el 32.4 % atiende localidades fuera de ella; el 18.3 % cubre parcialmente el municipio, y solo el 16.4 % ofrece cobertura total. Esta diversificación genera desafíos, como la falta de coordinación y desigualdades en el acceso, sobre todo en zonas rurales, lo que afecta de manera negativa estas áreas y pone en riesgo el cumplimiento de la Agenda 2030 en su Objetivo de Desarrollo Sostenible 6, relativo al agua y saneamiento (Soares, 2021). Otra consecuencia derivada de la incapacidad de los OOAPAS para garantizar el suministro de agua potable es la distribución mediante pipas, un método poco eficiente debido a los elevados costos que representa tanto para el gobierno como para los usuarios. Además, la calidad del agua distribuida por este medio es incierta, lo que puede representar un riesgo para la salud pública (Alarcón & Corona, 2018).

La gestión del agua potable, el alcantarillado y el saneamiento en México enfrenta diversos desafíos debido a la heterogeneidad en la estructura organizacional, financiamiento y operación de los prestadores de servicios, que presentan variaciones significativas en cuanto a cobertura de los servicios, tipo de infraestructura disponible y eficiencias operativas. Además, la disponibilidad de las fuentes hídricas,

infraestructuras obsoletas y problemas financieros son desafíos comunes que enfrentan estos organismos (Hernández, 2024).

Para fortalecer la toma de decisiones fundamentada en evidencia, resulta esencial clasificar a los OOAPAS en categorías homogéneas que permitan un análisis comparativo de sus características y faciliten el diseño de estrategias para su fortalecimiento adaptadas a sus condiciones específicas. En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo segmentar a los OOAPAS en México mediante el uso de datos abiertos del CNGMyDT CDMX para proponer una segmentación de los organismos operadores identificados por INEGI en la edición 2023 de este censo a través del uso de herramientas estadísticas para el análisis de datos.

El análisis de sistemas complejos de datos, como los derivados de un censo, ha mejorado significativamente gracias a los avances en las técnicas de modelado computacional, el aumento en la capacidad de procesamiento y por las mejoras en la gestión de datos (Chevez *et al.*, 2023).

Esta investigación destaca por segmentar los OOAPAS en categorías homogéneas mediante un método de aprendizaje automático no supervisado, capaz de identificar patrones sin intervención humana. Para ello, se usaron datos abiertos del CNGMyDT CDMX, edición 2023, al igual que una combinación de un análisis de componentes principales (PCA) con el algoritmo *K-means* para agrupar los organismos según sus componentes principales. De manera similar, Klien (2017) propuso una metodología para caracterizar la estructura de los organismos operadores de agua, utilizando *clustering* jerárquico y *K-means* a partir de datos del *International Benchmarking Network for Water and Sanitation Utilities* (IBNET). El análisis incluyó 1 306 entidades de más de 140 países y

consideró tres dimensiones: número de clientes, densidad de red y localidades atendidas. Se identificaron seis clústeres diferenciados. Destacó una división clara entre organismos de una sola localidad y aquellos que atienden múltiples. En los primeros, mayor volumen y densidad se relacionaron con menores costos y mejor servicio. Este patrón no fue evidente en organismos multiciudad. Un enfoque metodológico similar fue adoptado por Salazar y Lutz (2015), quienes analizaron los factores determinantes del desempeño de los prestadores de servicios de agua en México usando PCA y el análisis de *clustering* jerárquico (HCA). Los autores evaluaron una serie de indicadores clave para 106 organismos operadores de agua, abarcando cuatro dimensiones fundamentales: eficiencia operativa, sostenibilidad financiera, gestión de recursos humanos y cobertura del servicio. La muestra analizada por los autores se conformó en exclusiva por prestadores de servicio ubicados en municipios de tamaño mediano y grande, es decir, con una población superior a 50 000 habitantes. Los organismos se agruparon en cinco clústeres, lo que permitió identificar correlaciones significativas entre los indicadores de desempeño y proporcionó información relevante para el diseño de políticas públicas dirigidas a la mejora del sector. Sin embargo, la extrapolación de los resultados puede estar limitada por el reducido tamaño de la muestra, al igual que por el enfoque en prestadores de servicio ubicados exclusivamente en municipios de tamaño mediano y grande.

Materiales y métodos

El estudio se desarrolló en tres etapas metodológicas. En la primera, se identificaron y analizaron de forma descriptiva las variables operativas de los OOAPAS, como el número de tomas de agua potable, las conexiones de drenaje y los porcentajes de población con acceso a estos servicios, utilizando los datos del módulo Agua Potable y Saneamiento del CNGMyDT CDMX. Además, se incorporó la información del Censo de Población y Vivienda 2020, a fin de fortalecer el análisis con datos demográficos a nivel municipal.

En la segunda etapa se llevó a cabo la clasificación de los OOAPAS mediante el método PCA y el algoritmo *K-means*. El PCA es una técnica estadística que obtiene nuevo conjunto de variables denominadas componentes principales a partir de un conjunto inicial de variables correlacionadas, con el objetivo de identificar los componentes que reúnen la mayor cantidad de información sobre las variables operativas de los OOAPAS. El método PCA permite conservar la mayor cantidad de información posible, reduciendo la dimensionalidad de los datos (Jolliffe & Cadima, 2016). A partir de las variables más relevantes identificadas mediante el PCA, se aplicó el algoritmo *K-means*, el cual agrupa los OOAPAS en *k* clústeres basados en su similitud. El algoritmo funciona de manera iterativa, asignando cada punto de datos (OOAPAS a nivel municipal) al centroide más cercano y recalculando los centroides en función de los datos asignados a cada grupo. Este proceso se repite hasta que los centroides se estabilizan y la asignación de los datos deja de variar de manera significativa, lo que permite reducir la variabilidad y, al mismo tiempo, conformar los clústeres de manera óptima (Jain, 2010).

En la tercera etapa se caracterizaron los grupos resultantes para interpretar los patrones identificados y analizar las diferencias estructurales entre los prestadores de servicios de agua y saneamiento en México. El análisis incluyó variables clave como capacidad operativa, infraestructura y cobertura, así como factores socioeconómicos y geográficos que influyen en el desempeño de los organismos.

Resultados

Análisis descriptivo de las variables operativas

En este estudio se analizó la situación de OOAPAS en México utilizando seis variables operativas derivadas del CNGMyDT CDMX, que abarcan 4 169 prestadores de servicio distribuidos en 2 469 municipios (INEGI, 2023). Para evaluar la cobertura y capacidad instalada de los OOAPAS, se consideraron los datos relativos al número total de tomas conectadas a la red pública de agua potable (TomasAP), y el total de conexiones a la red de drenaje y alcantarillado (ConexDr). En cuanto a los indicadores relacionados con la accesibilidad a los servicios, se incluyó tanto el porcentaje de la población municipal con acceso al servicio de drenaje y alcantarillado de la red pública (Pob_Dr) como el porcentaje de la población con acceso al servicio de agua potable (Pob_AP). Para caracterizar el tamaño de los prestadores de servicio, se consideró el número total de personal empleado (Pers) en los OOAPAS y el ingreso total generado por el suministro de agua potable y saneamiento (IngApDr). Es importante señalar que en la última edición (2023) del CNGMyDT CDMX, el ingreso total no está disponible. Debido a su

relevancia para la caracterización, clasificación y análisis de los OOAPAS, el presente estudio emplea la información correspondiente al CNGMyDT CDMX 2021 que sí la contiene. Por último, se incluyó en el análisis la población total de cada municipio (Pob), lo que permitió dimensionar la demanda potencial de estos servicios.

Además, con el objetivo de profundizar en la caracterización, se incorporaron al análisis descriptivo tres indicadores adicionales que permiten evaluar la distribución y eficiencia de los servicios de agua potable y saneamiento. El primero es la relación $Pob/TomasAp$, calculada como el cociente entre la población total municipal con acceso al agua potable y el número de tomas de agua potable; este indicador facilita la estimación del promedio de personas por toma de agua. El segundo es la relación $Pob/ConexDr$, obtenida al dividir la población municipal con acceso al servicio entre el número total de conexiones de drenaje. Finalmente, se incorporó el indicador de ingreso per cápita del organismo operador ($IngApDr/PobTot$), calculado al dividir el ingreso anual del organismo operador entre la población total municipal, esto permite evaluar la capacidad de generación de ingresos del organismo en función del tamaño de la población atendida.

Para procesar y analizar de manera eficiente la información recopilada, se utilizaron técnicas estadísticas y herramientas avanzadas de programación mediante diversas bibliotecas del lenguaje *Python* (Python Software Foundation, 2025). En particular, se empleó *Matplotlib* para la generación de gráficos (Mathplotlib Development Team, 2025), así como la biblioteca especializada en aprendizaje automático, que proporciona diversos algoritmos de clasificación conocida como *Scikit-learn* (Pedregosa *et al.*, 2011).

La Figura 1 presenta la relación entre los ingresos municipales de los OOAPAS y seis variables operativas, incluyendo cobertura de servicios, tomas, conexiones, personal y población total. Los gráficos 1a y 1b muestran una alta concentración de municipios con menos de 400 mil tomas y conexiones, e ingresos inferiores a \$2 mil millones de pesos (puntos azules). Con el fin de optimizar la segmentación de los prestadores de servicios, los municipios cuyos OOAPAS superan ambos umbrales han sido clasificados como "Megaciudades", correspondiendo a los municipios de Ecatepec de Morelos (Estado de México), Guadalajara (Jalisco), León (Guanajuato), Monterrey (Nuevo León), Puebla (Puebla), Tijuana (Baja California) y Villa de Álvarez (Colima) (representados por puntos de color gris). Las gráficas muestran un valor atípico correspondiente a Ixtapaluca (punto rojo), con ingresos de \$15 mil millones de pesos.

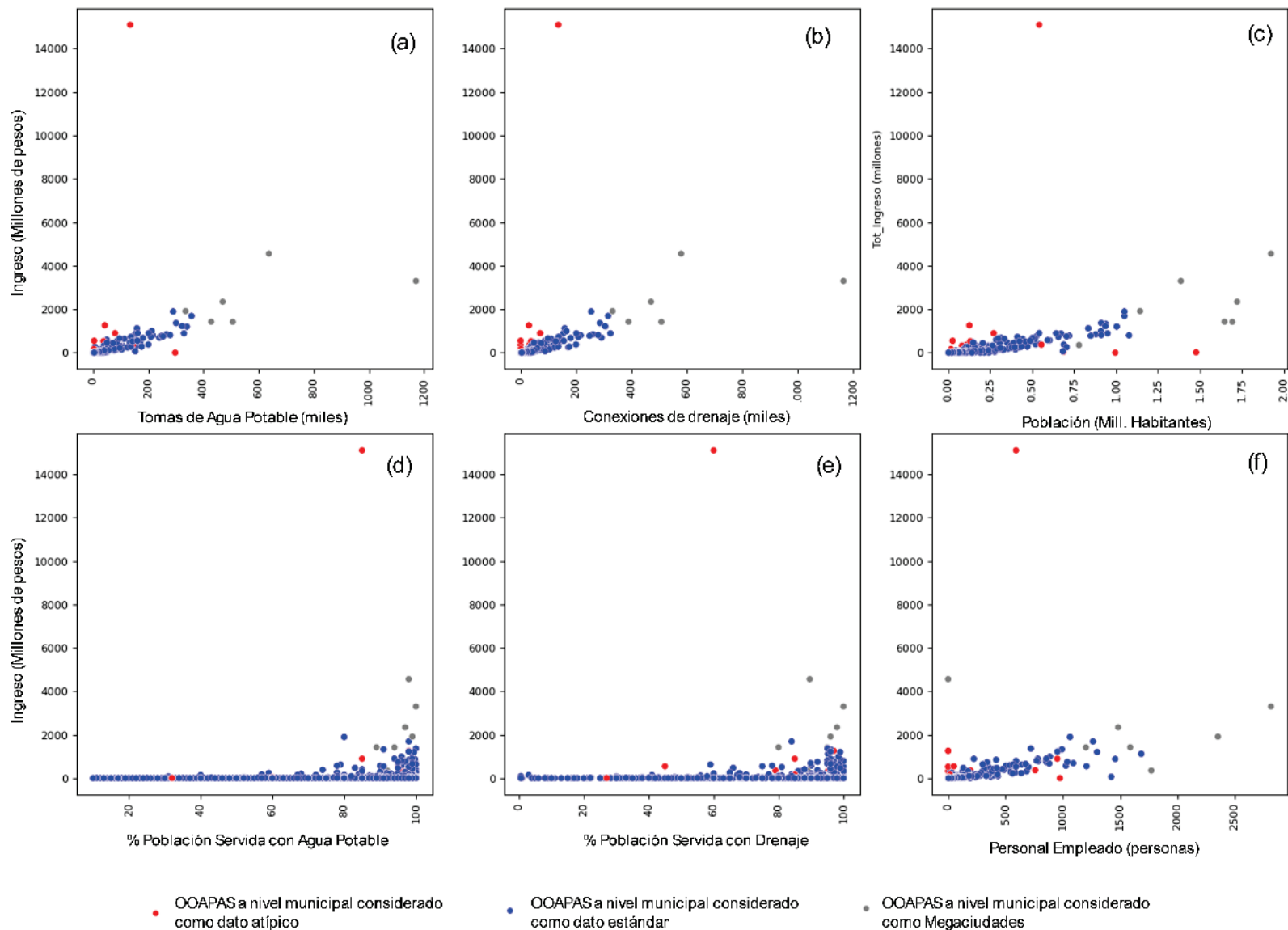


Figura 1. Relación entre el ingreso municipal de los OOAPAS y variables de infraestructura, cobertura de servicios y personal empleado.

En las figuras 1c y 1f predominan municipios con menos de 1.12 millones de habitantes y menos de 1 500 empleados, lo cual indica que la mayoría de los prestadores de servicios operan en localidades con una

densidad poblacional y una estructura laboral moderadas. En los gráficos 1d y 1e, la mayoría de los datos se concentra en altos porcentajes de cobertura de agua potable y drenaje. En conjunto, se confirma que la mayoría de los prestadores reportan ingresos inferiores a \$2 mil millones de pesos.

El análisis estadístico permitió identificar 36 OOAPAS atípicos en 24 municipios, lo que representa el 0.86 % del total, señalados como puntos rojos en la Figura 1. Tras la depuración y segmentación de los datos, el conjunto final quedó conformado por 4 133 OOAPAS distribuidos en 2 445 municipios. La Tabla 1 presenta las métricas estadísticas clave de las variables operativas, y los indicadores de distribución y eficiencia, excluyendo los casos clasificados como “Megaciudades”.

Tabla 1. Estadísticas de las variables operativas e indicadores de distribución y eficiencia de los OOAPAS en México.

Variables y unidades	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
<i>Tomas Agua Potable (AP): TomasAP (miles tomas)</i>	9.4	29.4	0.025	356.9
<i>Conexiones drenaje (DR): ConexDr (miles conexiones)</i>	10.3	31.1	0.003	324.1
<i>Ingreso Ap y Dr: IngApDr (mill. pesos)</i>	31.5	133.7	0.0	1 895.0
<i>Población municipal: Pob (miles habitantes)</i>	44.4	112.9	0.081	1 512.5
<i>% Pob. servida AP: Pob_AP (%)</i>	77.4	24.8	10.0	100
<i>% Pob. servida Dr: Pob_Dr (%)</i>	73.8	24.8	0.5	100
<i>Personal empleado: Persl (personas)</i>	40.51	124.7	1	1 684

Los resultados de la Tabla 1 muestran una alta dispersión en las variables operativas de los OOAPAS en México. El ingreso promedio es de \$31.5 millones de pesos y la población media asciende a 44 346 habitantes, con desviaciones estándar elevadas que reflejan la diversidad demográfica y económica entre municipios. En promedio, se registran 9.4 mil tomas de agua y 10.3 mil conexiones de drenaje por municipio, también con alta variabilidad. La cobertura promedio es del 77.4 % para agua potable y del 74 % para drenaje, con amplios rangos en ambos casos. Esta heterogeneidad en la prestación de servicios motivó la aplicación del algoritmo *K-means* para clasificar a los OOAPAS, apoyado por un análisis de componentes principales (PCA). La combinación de ambos métodos facilitó la identificación de grupos con características operativas similares, aportando una base para diseñar estrategias diferenciadas de mejora.

Análisis de componentes principales de los OOAPAS

La clasificación de los OOAPAS se realizó aplicando PCA y el algoritmo de clasificación *K-means*, utilizando las bibliotecas *scikit-learn* en *Python* (Pedregosa *et al.*, 2011). El PCA permitió identificar los componentes que capturan la mayor información de las principales variables operativas de los OOAPAS (Jolliffe, 2002), mientras que el algoritmo *K-means* se utilizó para agruparlos con base en dichos componentes principales.

El PCA aplicado a nivel municipal sobre 4 133 OOAPAS permitió identificar las variables operativas más informativas. El primer componente (PC1) explicó el 62.8 % de la varianza total y se asoció principalmente con variables relacionadas con la infraestructura de

servicios, recursos humanos, ingresos y tamaño poblacional. Por su parte, el segundo componente (PC2) explicó un 18.63 % adicional de la varianza y estuvo determinado por los porcentajes de población con acceso a agua potable y drenaje, lo cual indica un factor diferenciado vinculado con la cobertura de servicios. Posteriormente, se realizó un nuevo PCA empleando un subconjunto de las variables con mayor peso en el PC1, lo que resultó en un aumento de la varianza explicada por los dos primeros componentes, pasando de 81.42 a 92.22 %. Esto confirma que las variables seleccionadas capturan de forma más eficiente la estructura subyacente de los datos, reduciendo la dimensionalidad sin pérdida significativa de información.

Segmentación de los OOAPAS

Con base en cinco variables seleccionadas del primer componente principal (PCA1: *TomasAP*, *ConexDr*, *Pob*, *IngApDr* y *Pers*), se aplicó el método *K-means* para clasificar los 4 133 OOAPAS. El análisis resultó en la formación de tres clústeres con perfiles operativos distintos. La segmentación mostró alta cohesión interna, validada por un coeficiente de silueta (*Silhouette Score*) de 0.83, lo que indica una adecuada separación entre grupos. Esta métrica, que varía entre -1 y 1, refleja una mejor segmentación cuanto más se aproxima a 1, lo que respalda la efectividad del modelo.

A pesar del alto coeficiente de silueta en la clasificación inicial, se observó que el clúster 1 concentró 3 793 OOAPAS, lo que indicó la necesidad de una segmentación más detallada. Al subdividir este clúster, se formaron cuatro subgrupos con un coeficiente de silueta de 0.51.

Aunque el valor de la métrica es menor, mostró una distribución adecuada de los OOAPAS, mejorando la representatividad y especificidad de los clústeres. Los resultados de la clasificación en seis clústeres, incluida la de Megaciudades, se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. OOAPAS por clase, tipo de gestión y municipios.

Clúster	Número de OOAPAS según el tipo de gestión					Número de municipios
	Social	Pública municipal e inter-municipal	Público estatal	Privada	Total	
<i>Clúster 1</i>	392	1 163	69	0	1 624	1 338
<i>Clúster 2</i>	496	414	59	0	969	484
<i>Clúster 3</i>	586	264	70	0	920	344
<i>Clúster 4</i>	159	96	23	2	280	117
<i>Clúster 5</i>	142	88	37	2	269	114
<i>Clúster 6</i>	12	28	9	2	51	40
<i>Clúster MC</i>	10	5	3	2	20	8
Total	1 797	2 058	270	8	4 133	2 445

La distribución de los OOAPAS entre los clústeres muestra una gran variabilidad en cantidad y tipo de gestión. El clúster 1 concentra el 39.3 % del total con 1 624 OOAPAS, seguido por el clúster 2 con 969 (23.4%) y el clúster 3 con 922 (22.3 %), lo cual muestra una distribución relativamente equilibrada de los operadores. En contraste, los clústeres 4, 5 y 6 tienen una menor cantidad de organismos: 278 (6.7 %), 269 (6.5 %) y 51 (1.2 %), respectivamente. Finalmente, el clúster MC tiene solo 20 OOAPAS, representando el 0.5 % del total. Los datos de la tabla 2

muestran una clara concentración de OOAPAS en los clústeres 1, 2 y 3, que representan el 85 % del total nacional, mientras que los clústeres restantes están más fragmentados. Los modelos de gestión social y pública municipal o intermunicipal predominan en los primeros tres clústeres, que abarcan entre el 36 y 45 % del total. En contraste, los clústeres 4, 5, 6 y MC tienen una menor participación (8 y 5 %, respectivamente). La gestión pública estatal sigue una tendencia similar, concentrándose en los clústeres 1, 2 y 3 con un 5 %, y apenas 2 % en los otros clústeres. La gestión privada tiene una representación marginal, con un 0.2 % en cuatro clústeres.

La distribución gráfica de las variables operativas de los OOAPAS en relación con los resultados de los clústeres obtenidos se presenta en la Figura 2. Esta figura está compuesta por cuatro gráficas en la parte superior que corresponden a los clústeres 1, 2, 3 y 4; mientras que las cuatro gráficas en la parte inferior representan a todos los clústeres (1, 2, 3, 4, 5, 6 y MC). En todas las gráficas, el eje x representa una variable operativa: tomas de agua potable (miles), conexiones de drenaje (miles), población atendida (miles) y personal empleado; el eje y muestra el ingreso en millones de pesos. Estas gráficas permiten observar la dispersión de los puntos en función de las variables operativas y cómo se distribuyen los OOAPAS a nivel municipal según los clústeres identificados.

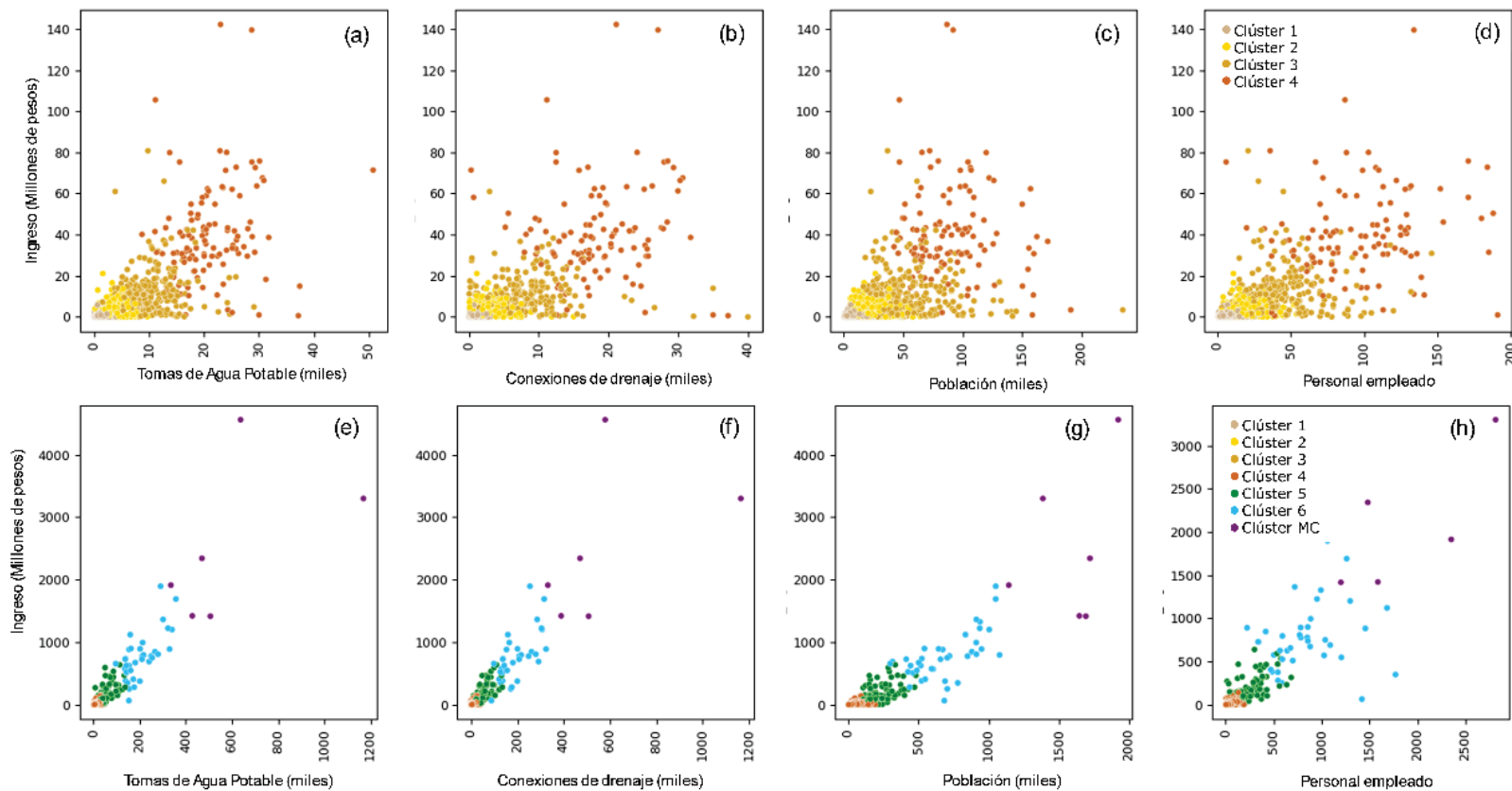


Figura 2. Distribución de las variables operativas de los OOAPAS según clúster.

Los gráficos 2a, 2b, 2c y 2d muestran 2 283 puntos que representan 3 793 OOAPAS de los clústeres 1, 2, 3 y 4. La mayoría de estos puntos corresponden a municipios con ingresos anuales inferiores a \$140 millones de pesos, lo que indica una capacidad financiera baja. Aunque hay cierta dispersión, pocos organismos superan los \$100 millones de pesos. Las relaciones entre ingresos y variables operativas no son lineales, pues algunos municipios con altos valores en tomas, conexiones, población o personal no necesariamente tienen ingresos más altos. Las figuras 2e, 2f, 2g y 2h muestran la concentración de OOAPAS de todos

los clústeres, destacando los 340 OOAPAS en 162 municipios de los clústeres 5, 6 y MC. Estos clústeres muestran una relación más clara entre ingresos y variables operativas, con valores de ingresos significativamente más altos, algunos superando los \$3 000 millones de pesos. El clúster MC presenta los valores más extremos, reflejando organismos con infraestructura y capacidad financiera superiores.

Los diagramas de caja y bigotes permiten visualizar la heterogeneidad en la estructura operativa y financiera de los organismos operadores, resaltando las diferencias significativas en las diversas variables operativas entre los distintos clústeres (Figura 3). En la primera fila (gráficos 3a a 3e) se muestran los resultados de los clústeres 1 a 4, mientras que en la segunda fila (gráficos 3f a 3j) se incluyen los valores agregados de los clústeres 1 a 4, así como los correspondientes a los clústeres 5, 6 y MC.

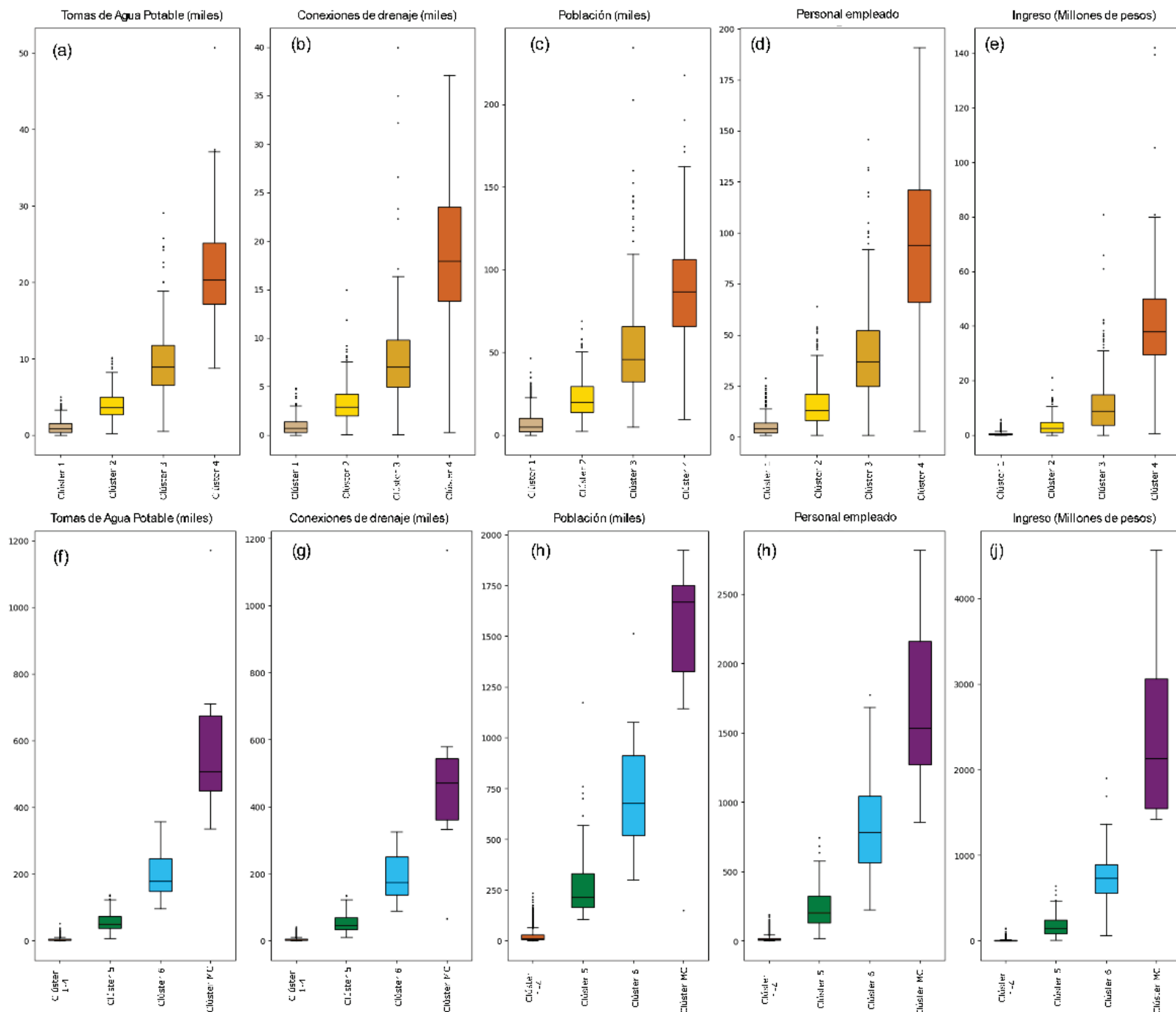


Figura 3. Gráficos box-plot de las variables operativas de los OOAPAS según clúster.

Las figuras 3a y 3b muestran la distribución de tomas de agua potable y conexiones de drenaje por clúster (1 al 4). Se observa una tendencia creciente en la infraestructura a medida que se avanza hacia los clústeres con mayor capacidad operativa (a la derecha del gráfico). Los diagramas de caja de estos clústeres muestran medianas más altas y un rango intercuartílico (RIC) más amplio, indicando mayor dispersión y heterogeneidad en las infraestructuras. La presencia de valores atípicos en todos los clústeres sugiere que algunos organismos tienen una cantidad de tomas y conexiones mucho mayor que el promedio. La Figura 3c muestra una correlación entre el tamaño de la población atendida y la infraestructura disponible, con los clústeres 2, 3 y 4 exhibiendo valores más altos. No obstante, la distribución asimétrica sugiere que algunos organismos atienden a poblaciones mucho mayores sin tener infraestructura proporcional.

Los gráficos de la Figura 3d muestran un aumento en la cantidad de personal conforme crece la capacidad operativa de los organismos, aunque con considerable dispersión, lo que indica diferencias en el tamaño de la fuerza laboral dentro de clústeres similares. Los gráficos de ingresos (Figura 3e) presentan una distribución asimétrica, con la mayoría de los valores en rangos bajos y algunos organismos con ingresos anuales más altos, lo que refleja desigualdad financiera posiblemente relacionada con tarifas, financiamiento o eficiencia operativa. En la segunda fila de gráficos, los clústeres 5, 6 y MC muestran una mayor concentración de infraestructura, población atendida, personal e ingresos, con diferencias marcadas en los valores máximos y la dispersión de los datos. En cuanto a infraestructura (Figuras 3f y 3g), los clústeres 5 y 6 tienen valores mucho más altos en tomas de agua potable y conexiones de drenaje,

mientras que el clúster MC destaca por su infraestructura más amplia. Los valores atípicos indican que algunos organismos tienen infraestructuras mucho mayores. Un patrón similar se observa en la población atendida (Figura 3h), donde los clústeres 5 y 6 atienden a poblaciones mucho mayores, y el clúster MC muestra la mayor heterogeneidad con un alcance poblacional excepcionalmente alto.

El gráfico de personal empleado (Figura 3h) muestra una tendencia similar a las variables anteriores, con los clústeres 5 y 6 exhibiendo medianas superiores y alta dispersión, lo que sugiere que algunos organismos requieren una plantilla significativamente mayor que otros de capacidad operativa similar. Los ingresos muestran la mayor dispersión entre las variables analizadas (Figura 3j), con el clúster MC destacando por sus valores extremos, lo que indica organismos con ingresos excepcionalmente altos. Esta variabilidad podría deberse a diferencias en tarifas, financiamiento o eficiencia operativa. Mayor detalle de los principales estadísticos descriptivos por clúster mostrados en la Figura 3 se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Estadísticos por clúster.

Abreviaturas y unidades		Clúster 1	Clúster 2	Clúster 3	Clúster 4	Clúster 5	Clúster 6	Clúster MC
<i>Municipios</i>	Cantidad	1 338	484	344	117	114	40	8
	% nacional	54.1 %	19.8 %	14.0 %	4.8 %	4.7 %	1.6 %	0.4 %
<i>OOAPAS</i>	Cantidad	1 624	969	920	280	269	51	20
	% nacional	39.4 %	23.4 %	22.3 %	6.8 %	6.5 %	1.2 %	0.5 %
<i>IngApDr</i> (millones de pesos)	Mínimo	0.001	0.000	0.014	0.615	5.303	64.444	1,416.261
	Mediana	0.168	2.485	8.691	37.825	143.592	732.351	2 127.640
	Máximo	5.775	21.070	80.778	142.195	638.898	1 895.037	4 559.695
	Promedio	0.497	3.348	10.741	41.277	178.779	774.559	2 491.918
<i>TomasAP (Miles tomas)</i>	Mínimo	0.025	0.191	0.535	3.859	7.151	95.853	335.097
	Mediana	0.806	3.605	8.889	20.261	49.520	178.361	506.375
	Máximo	5.000	10.168	29.088	50.744	137.189	356.964	1 170.135
	Promedio	1.073	3.890	9.455	21.169	57.432	202.175	608.252
<i>ConexDr (Miles conexiones)</i>	Mínimo	0.003	0.020	0.032	0.299	11.000	88.204	65.505
	Mediana	0.710	2.890	7.035	17.740	45.300	174.039	470.367
	Máximo	4.825	15.000	40.000	37.148	135.509	324.115	1 164.305
	Promedio	0.932	3.188	7.828	18.435	53.830	191.234	501.121
<i>Población (miles habitantes)</i>	Mínimo	0.081	2.456	4.794	9.416	105.766	297.562	149.762
	Mediana	4.984	19.723	45.931	84.666	213.722	677.905	1 668.767
	Máximo	46.409	69.086	234.661	217.686	1 173.351	1 512.450	1,922.523
	Promedio	7.341	22.698	53.754	90.551	268.086	707.533	1 436.893
<i>PobAP %</i>	Mínimo	10.0	10.0	10.0	31.0	35.0	74.0	89.0
	Mediana	80.0	85.0	90.0	93.0	95.0	97.5	98.5
	Máximo	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	Promedio	72.9	78.9	82.6	88.3	90.4	94.7	97.0

Abreviaturas y unidades		Clúster 1	Clúster 2	Clúster 3	Clúster 4	Clúster 5	Clúster 6	Clúster MC
<i>PobDr %</i>	Mínimo	0.60	0.85	0.50	4.00	0.60	59.00	80.00
	Mediana	80.0	80.0	83.00	90.00	92.5	96.0	97.0
	Máximo	100.0	100.0	100.00	100.00	100.0	100.0	100.0
	Promedio	69.09	74.46	76.54	81.77	85.94	92.42	94.45
<i>Persl (personas)</i>	Mínimo	1	1	1	3	16	224	854
	Mediana	4	13	37	93	201	783	1 536
	Máximo	29	64	146	191	742	1 772	2 816
	Promedio	5	16	41	93	236	841	1 716

Aspectos clave de la segmentación de clústeres

Clúster 1

Este grupo es el más numeroso, con 1 164 OOAPAS, que representa el 39.4 % del total nacional. El 68 % está administrado por gobiernos municipales y el 23 % por entidades comunitarias. Considerando el nivel de marginación municipal del Conapo (2022), a nivel nacional el 4.1 % de los OOAPAS opera en municipios de marginación muy alta y el 12.7 % en municipios con marginación alta, sumando el 16.8 % del total. El resto se encuentra en municipios con marginación media (9.3 %), baja (8.9 %) y muy baja (4.1 %). Geográficamente, en este clúster se concentran OOAPAS localizados sobre todo en el estado de Oaxaca, con el 34 % de los organismos, seguido por Veracruz (8 %) y Tlaxcala (6 %). Los organismos de este grupo presentan ingresos bajos, con un máximo de \$5 775 millones de pesos anuales y una infraestructura limitada, con un máximo de 5 000 tomas de agua y 4 825 conexiones de drenaje. La

población máxima atendida es de 46 409 habitantes, con coberturas promedio de 72.9 % en agua potable y 69.09 % en drenaje. El número de empleados es reducido, con un promedio de cinco por organismo. El clúster presenta una posible sobrecarga en la infraestructura, con un promedio de 6.68 habitantes por toma de agua y 20.64 habitantes por conexión de drenaje. El ingreso per cápita es bajo, con un promedio de \$148.59 pesos anuales por habitante.

Clúster 2

Este clúster, el segundo más numeroso, con 969 OOAPAS (23.4 % del total nacional), está compuesto en un 49 % por organizaciones comunitarias y un 30 % por organismos municipales. En cuanto a la marginación, el 1.4 % opera en municipios con marginación muy alta, el 2.9 % en municipios con marginación alta, y el resto se distribuye entre municipios con marginación media (4.2 %), baja (7.1 %) y muy baja (7.8 %). Geográficamente, Tlaxcala, Hidalgo y Nayarit concentran el 30 % de los OOAPAS de este clúster, con una mayor dispersión en otras entidades. En términos financieros, los ingresos de este clúster superan los del clúster 1, alcanzando hasta \$21 millones de pesos. Su infraestructura es más robusta, con hasta 10 168 tomas de agua y 15 000 conexiones de drenaje. La población máxima atendida es de 69 086 habitantes, con un promedio de 22 698 por organismo y cobertura de agua potable y drenaje de 78.9 y 74.5 %, respectivamente. El número de empleados varía de 1 a 64, con un promedio de 16. El indicador de habitantes por toma es de 6.25 y el de habitantes por conexión de drenaje es de 24.25, lo cual indica

deficiencias en la cobertura. El ingreso per cápita promedio es de \$252.65 de pesos anuales.

Clúster 3

Este clúster incluye 922 organismos, representando el 22.3 % del total nacional. El 62 % de las organizaciones son comunitarias, el 15 % son descentralizadas municipales y el 14 % son administradas por el municipio. Solo el 3.4 % de los organismos se encuentra en municipios con alta y muy alta marginación, mientras que el resto está distribuido en municipios de marginación media (3 %), baja (8.2 %) y muy baja (7.7 %). En términos de distribución geográfica, los estados con mayor representación en este clúster son Nayarit, Hidalgo y Guerrero, con participaciones del 16, 13 y 12 %, respectivamente.

Los ingresos de los organismos en este clúster alcanzan un máximo de \$80.778 millones de pesos. Su infraestructura mejora de forma significativa, con hasta 29 088 tomas de agua potable y 40 000 conexiones de drenaje. La población máxima atendida es de 234 661 habitantes, con coberturas promedio de 82.7 % en agua potable y 76.5 % en drenaje. El número de empleados varía entre 1 y 37, con un promedio de 41 por organismo. Aunque esta cifra refleja una mayor capacidad operativa en comparación con los clústeres 1 y 2, también se debe considerar que la población atendida es significativamente mayor. La relación pob/tomasAP es de 6.5 habitantes por toma, y pob/conxDr es de 21.45 habitantes por conexión, valores similares a los clústeres previos. El ingreso per cápita es de \$324.47 de pesos por habitante.

Clúster 4

El clúster 4, con 117 organismos (6.8 % del total nacional), es menor en tamaño que los anteriores. El 53 % de estas organizaciones son comunitarias, el 23 % son descentralizadas municipales y el 10 % están bajo administración municipal. La mayoría opera en municipios con marginación baja y muy baja (18 y 80 %, respectivamente). Los estados con mayor representación son Morelos, Tlaxcala e Hidalgo. Financieramente, los ingresos máximos alcanzan \$142.195 millones de pesos, un 76 % más que el clúster 3. En infraestructura, tiene hasta 50 744 tomas de agua y 37 148 conexiones de drenaje. La población máxima atendida es de 217 686 habitantes, con coberturas promedio de 88.1 % en agua potable y 81.9 % en drenaje. En términos de capacidad operativa, el número de empleados en estas organizaciones varía entre 3 y 191 trabajadores, con un promedio de 94 empleados por organismo, lo que equivale a 2.5 veces el promedio registrado en el clúster 3. Esto indica una capacidad operativa superior, aunque la población atendida es ligeramente menor, lo que se traduce en niveles de cobertura más elevados en comparación con el clúster 3. Los indicadores operativos muestran que la relación pob/tomasAP es de 3.95 habitantes por toma y la relación pob/conxDr es de 8.75 habitantes por conexión, valores más bajos que en los clústeres anteriores debido a la mayor cobertura y a un aumento en el número de empleados por organismo. Además, el ingreso per cápita en este clúster es de \$578.42 pesos, superior al de los clústeres previos.

Clúster 5

El clúster 5, compuesto por 114 organismos (4.7 % del total nacional), tiene una estructura jurídica similar al clúster 4, con el 51 % de entidades comunitarias, el 22 % descentralizadas municipales y el 9 % bajo administración municipal. A diferencia del clúster 4, la mayoría de los OOAPAS de este clúster se encuentran en municipios con marginación muy baja (96 %). Este clúster tiene una distribución geográfica dispersa, con una mayor concentración en el Estado de México (16 %), seguido por Guerrero y Nayarit (12 % cada uno). Sus ingresos son 4.5 veces mayores que los del clúster 4, alcanzando un máximo de \$638.8 millones de pesos. Su infraestructura de agua potable es 2.7 veces mayor, con 137 189 tomas, y la de drenaje es 3.6 veces más amplia, con 135 509 conexiones. La población máxima atendida es de 1 173 351 habitantes, 5.4 veces más que en el clúster 4, y las tasas de cobertura en agua potable y drenaje son del 90.4 y 85.94 %, respectivamente. El número de empleados varía entre 16 y 742, con un promedio de 94 empleados por organismo, 2.5 veces el promedio del clúster 3. En términos de eficiencia operativa, la relación pob/tomasAP es de 4.01 habitantes por toma, similar al clúster 4. Sin embargo, la relación pob/conxDr es de 3.91, indicando mayor eficiencia en drenaje. El ingreso per cápita es de \$916.96 pesos, un 1.5 veces mayor que en el clúster 4.

Clúster 6

Este clúster incluye 51 organismos, el 1.6 % del total nacional, siendo el segundo menos numeroso. A diferencia de los clústeres anteriores, el 47 % opera bajo un esquema descentralizado municipal, seguido por el

comunitario (22 %) y el descentralizado estatal (18 %). Similar al clúster 5, el 99 % se ubica en municipios con marginación muy baja. Geográficamente, destaca el Estado de México (33 %) y Tamaulipas (8 %). Los ingresos alcanzan un máximo de \$1 895.03 millones de pesos, triplicando los del clúster 5. La infraestructura también es mayor, con 356 964 tomas de agua potable y 324 115 conexiones de drenaje. En este clúster, el personal operativo va de 224 a 783 empleados, con un promedio de 783 por organismo, 3.5 veces más que en el clúster 5. La población máxima atendida es de 1 512 450 habitantes, 1.3 veces mayor que en el clúster anterior. Las coberturas promedio también son más altas, con 94.7 % en agua potable y 92.42 % en drenaje. En cuanto a eficiencia operativa, este clúster registra promedios bajos de 3.27 habitantes por toma y 3.45 por conexión, lo que refleja alta eficiencia. El ingreso per cápita alcanza \$1 220 pesos, superando al clúster 5 en 1.3 veces y siendo 8.2 veces mayor que en el clúster 1, lo que lo posiciona como el segundo más sostenible financieramente.

Clúster MC

Este grupo incluye a los organismos de mayor escala y capacidad operativa, con solo 20 OOAPAS (0.5 % del total nacional), ubicados en municipios como Ecatepec, Guadalajara, León, Monterrey, Puebla, Tijuana y Villa de Álvarez (Colima). Presenta la mayor diversidad jurídica: 35 % opera como asociaciones civiles, 15 % como descentralizados municipales, 15 % como comunitarios y 10 % como concesiones. Desde una perspectiva socioeconómica, el 100 % de los OOAPAS en este clúster se localiza en municipios con marginación muy baja. Desde el punto de

vista financiero registran ingresos de \$4 559.69 millones de pesos, 2.4 veces más que el clúster 6. Su infraestructura es la más amplia: 1 170 135 tomas de agua (3.3 veces más) y 1 164 305 conexiones de drenaje (3.6 veces más que el clúster 6). Operativamente, emplean entre 854 y 2 816 personas, con un promedio de 1 716, el doble del promedio del clúster 5. Atienden hasta 1 922 523 habitantes, 1.3 veces más que el clúster 6. Sus coberturas son las más altas: 97.0 % en agua potable y 94.45 % en drenaje. Además, tienen los mejores indicadores de eficiencia: 2.55 habitantes por toma y 2.84 por conexión. El ingreso per cápita es también el más alto: \$1 625 pesos por habitante al año, que refleja máxima eficiencia y sostenibilidad.

Conclusiones

El análisis de la estructura y desempeño de los OOAPAS en México evidencia una notable heterogeneidad y complejidad en el sistema de gestión del agua a nivel nacional. El análisis descriptivo reveló que 20 OOAPAS presentan infraestructuras excepcionalmente grandes y se ubican en importantes núcleos de población, por lo que, debido a su escala, requirieron un tratamiento diferenciado y fueron agrupados manualmente en el clúster MC. Posteriormente, la aplicación del análisis de componentes principales, en combinación con el algoritmo de agrupamiento *K-means*, permitió identificar seis clústeres con diferencias significativas. Este enfoque facilitó el reconocimiento de patrones relevantes en la relación entre las variables analizadas, a partir del aprovechamiento de los datos abiertos del censo de gobiernos locales del INEGI. El análisis también revela desigualdades significativas en las tasas

de cobertura de agua potable y drenaje entre los diferentes clústeres de OOAPAS. En particular, los clústeres 1, 2 y 3 presentan coberturas promedio inferiores al 83 %, mientras que los clústeres 4, 5, 6 y MC logran coberturas superiores al 85 %. Esta disparidad resalta la necesidad de implementar estrategias que promuevan una mayor equidad en el acceso a estos servicios esenciales. Asimismo, se destaca que un alto porcentaje de los OOAPAS se localiza en municipios con niveles de marginación muy alta y alta. Este hallazgo indica que las comunidades más vulnerables son las que enfrentan los mayores desafíos en el acceso a servicios básicos, lo que pone de manifiesto la necesidad de atención prioritaria en tales áreas.

En términos financieros, los OOAPAS de menor tamaño, correspondientes a los clústeres 1, 2 y 3, enfrentan limitaciones significativas debido a sus bajos ingresos per cápita. Dicha situación restringe su capacidad para mejorar la infraestructura y calidad de los servicios, lo que repercute de forma negativa en la calidad de vida de la población atendida. Por otro lado, los clústeres 4 y 5 han mostrado avances notables en infraestructura y eficiencia operativa, evidenciados por el aumento en el número de tomas de agua y conexiones de drenaje.

La capacidad operativa de los OOAPAS también varía de modo considerable entre los clústeres, siendo el clúster 6 el que presenta la mayor cantidad de empleados por organismo, lo que se traduce en una atención y gestión más efectivas de los servicios. A pesar de las mejoras observadas, la relación entre la población atendida y la infraestructura disponible sugiere que muchos OOAPAS aún enfrentan rezagos en sus sistemas, lo que podría comprometer la calidad del servicio.

Desde una perspectiva financiera, el clúster MC, que agrupa los OOAPAS más grandes y eficientes, se distingue por tener los ingresos per cápita más altos. Esto refleja una mayor sostenibilidad financiera y una capacidad superior para invertir en mejoras de infraestructura y atención al usuario. Además, se evidencia que la marginación municipal impacta directamente en el desempeño de los OOAPAS, donde aquellos ubicados en áreas con menor marginación tienden a exhibir mejores indicadores de cobertura y eficiencia operativa.

En cuanto al tipo de gestión, se observa una notable diversidad en la estructura de los OOAPAS, predominando aquellos que operan bajo regímenes jurídicos municipales y comunitarios. Se destaca que en las localidades con menor número de habitantes (clústeres 1, 2 y 3), los modelos de gestión que predominan son el municipal y el comunitario; mientras que en las ciudades medianas (clústeres 4 y 5) y en las grandes urbes (clústeres 6 y MC), la administración tiende a ser descentralizada por los municipios o por los gobiernos estatales.

La comparación entre el tipo de gestión, el grado de marginación, así como la distribución por estado a nivel clúster, permitió identificar patrones en la administración del agua en México. Se observa que los modelos de gestión más descentralizados predominan en estados con una mayor cantidad de OOAPAS, mientras que en zonas con alta marginación municipal los esquemas comunitarios juegan un papel fundamental. Además, las entidades con mayor proporción de concesiones privadas suelen coincidir con municipios de baja marginación, lo cual evidencia que la inversión privada en la gestión del agua está presente en municipios con mayor desarrollo económico e institucional.

El análisis demuestra que si bien algunos organismos cuentan con infraestructura y recursos financieros sustancialmente superiores, otros operan con limitaciones significativas, lo que podría afectar la calidad y cobertura del servicio. Estos resultados resaltan la necesidad de estrategias diferenciadas para el fortalecimiento institucional y financiero de los organismos operadores, sobre todo en los clústeres con menor capacidad. Los hallazgos de este trabajo pueden incorporarse para mejorar los diagnósticos de los programas presupuestarios que canalizan apoyos económicos para mejorar los servicios de agua y saneamiento, pues es en la identificación de la problemática en donde se orienta el objetivo que se atenderá desde estos programas presupuestarios y se establecerán las métricas adecuadas para dar seguimiento a su implementación. Estos resultados pueden plasmarse en dos ámbitos: el federal, a través del programa presupuestario Proagua, que opera la Comisión Nacional del Agua (Conagua) en México y a través del cual se distribuyen apoyos económicos a los operadores municipales urbanos, rurales y comunitarios con reconocimiento municipal; y el estatal, en las entidades federativas que cuenten con programas presupuestarios con recursos propios de apoyo a la mejora de los servicios de agua y saneamiento.

Finalmente, los resultados del estudio subrayan la imperante necesidad de implementar políticas públicas que fortalezcan tanto la infraestructura como la gestión de los OOAPAS, especialmente en municipios con alta marginación. Esto es fundamental para garantizar un acceso equitativo a servicios de agua potable y saneamiento en todo el país, a fin de contribuir a mejorar la calidad de vida de las comunidades más vulnerables. En conclusión, el análisis de los OOAPAS en México pone

de manifiesto la complejidad del sistema y la urgencia de abordar las disparidades existentes para avanzar hacia una gestión más equitativa y eficiente de los recursos hídricos.

Referencias

- Alarcón, J., & Corona, R. (2018). La (in)capacidad institucional para una gestión eficiente y de calidad del agua en las ciudades mexicanas. En: Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO) (ed.). *Califica a tu alcalde: manual urbano para ciudadanos exigentes* (pp. 71-77). Recuperado de <https://imco.org.mx/wp-content/uploads/2018/11/m.La-incapacidad-institucional-ICU-2018.pdf>
- Arellano-Gault, D., & Blanco, F. (2013). *Políticas públicas y democracia* (primera edición). Instituto Federal Electoral. <https://archivos.juridicas.unam.mx/www/bjv/libros/8/3565/1.pdf>
- Beltrán-Reyna, N. (2019). Propuesta metodológica para estudiar los sistemas de información en los organismos operadores de agua potable. En: Perló, C. M., & Zamora, S. I. (eds.). *El estudio del agua en México. Nuevas perspectivas teórico-metodológicas* (pp. 117-150). Universidad Nacional Autónoma de México-Instituto de Investigaciones Sociales. <https://ru.iis.sociales.unam.mx/handle/IIS/5691>
- Chevez, C. R., Pinell, F., & Mejía, Q. Á. A. (2023). Simulación del proceso de recarga para aguas subterráneas utilizando redes neuronales artificiales como método de aproximación en el acuífero Las Sierras, Nicaragua. *Revista Torreón Universitario*, 12(33). <https://doi.org/10.5377/rtu.v12i33.15896>

Conapo, Consejo Nacional de Población. (2022). *Datos abiertos del gobierno de México. Obtenido de Índice de Marginación y Carencias Poblacionales por Localidad, Municipio y Entidad 2020*. <https://www.gob.mx/conapo/documentos/indices-de-marginacion-2020-284372>

Hernández, P. (2024, 12 de julio). *Estos son los desafíos que enfrentan los organismos operadores en México*. Asociación Nacional de Entidades de Agua y Saneamiento (ANEAS). <http://www.aneas.com.mx/noticia-10/>

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2023). *Censo nacional de gobiernos municipales y demarcaciones territoriales de la Ciudad de México*. <https://www.inegi.org.mx/programas/cngmd/2023/>

Jain, A. K. (2010). Data clustering: 50 years beyond K-Means. *Pattern Recognition Letters*, 31(8), 651-666. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2009.09.011>

Jolliffe, I. T. (2002). *Principal component analysis* (2nd ed.). Springer-Verlag.

Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: A review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2065). <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>

Klien, M. (2017). *Statistical analysis: Global study on the aggregation of water supply and sanitation utilities*. <https://doi.org/10.1596/27981>

Matplotlib Development Team. (2025). Matplotlib (3.10.0) [Software].

<https://matplotlib.org>

Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., & Duchesnay, É. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825-2830. <https://www.jmlr.org/papers/volume12/pedregosa11a/pedregosa11a.pdf>

Python Software Foundation. (2025). *Python (3.12.11)* [software].

<https://www.python.org/>

Salazar, A., & Lutz, A. N. (2015). Factores asociados al desempeño en organismos operadores de agua potable en México. *Región y Sociedad*, 27(62), 5-26. <https://doi.org/10.22198/rys.2015.62.a36>

Soares, D. (2021). El agua en zonas rurales de México. Desafíos de la Agenda 2030. *Entre Diversidades. Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 8(2), 191-211. <https://doi.org/10.31644/ed.v8.n2.2021.a09>