

Desarrollo de un modelo de valoración inmobiliaria mediante análisis estadístico clásico y espacial en Guadalajara, Jalisco, México

Development of a Real Estate Valuation Model Using Classical and Spatial Statistical Analysis in Guadalajara, Jalisco, Mexico

María Isabel De la Cruz Luis¹

Sandra Martínez Cuevas²

María del Carmen Morillo Balsera³

Recibido 1 de noviembre de 2024; aceptado 24 de enero de 2025

RESUMEN

Durante la última década, el municipio de Guadalajara, Jalisco, México, enfrenta los retos de una urbanización acelerada y dispersa en la que resalta la fuerte demanda de viviendas asequibles que garanticen el bienestar de la población que en la urbe habita. No obstante, el municipio carece de un criterio de valoración objetivo. Razón por la que la investigación se centra en desarrollar un modelo predictivo que permita estimar el valor de mercado de las viviendas unifamiliares mediante la aplicación de dos técnicas estadísticas: el análisis estadístico clásico y geoestadístico. La aplicación de estas técnicas tiene como objetivo analizar datos provenientes de una muestra representativa de viviendas en el municipio, explicando las correlaciones y dependencias de las mismas

¹ Universidad Politécnica de Madrid, España, correo electrónico: m.delacruz@alumnos.upm.es.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5221-9122>

² Universidad Politécnica de Madrid, España, correo electrónico: sandra.mcuevas@upm.es.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2150-3251>

³ Universidad Politécnica de Madrid, España, correo electrónico: mariadelcarmen.morillo@upm.es.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0788-8394>

con la finalidad de estimar su valor. El modelo propuesto integra un análisis de Regresión Lineal Múltiple para identificar las principales variables que influyen en el valor inmobiliario con intención de predecir los precios de las viviendas y, por otra parte, el método de interpolación Kriging Ordinario para generar un mapa que represente los valores inmobiliarios en toda la zona de estudio. La combinación de estos métodos o técnicas nos permite abordar la complejidad de las relaciones espaciales y multivariadas del mercado inmobiliario en la zona de estudio.

Palabras clave: *Valoración Inmobiliaria, modelo de Regresión Lineal Múltiple, Análisis Espacial, Geoestadística, Kriging Ordinario.*

RESUMEN

In the past decade, Guadalajara, Jalisco, Mexico, has experienced rapid and dispersed urbanization, driven by a growing demand for affordable housing that supports the well-being of its residents. However, the municipality lacks objective criteria for property valuation. To address this gap, this research aims to develop a predictive model to estimate the market value of single-family homes by applying classical statistical analysis and geostatistical analysis. The model analyzes data from a representative sample of homes, identifying key correlations and dependencies to improve valuation accuracy. It integrates Multiple Linear Regression to pinpoint the primary factors influencing real state prices and employs the Ordinary Kriging interpolation method to generate a spatial map of property values across the study area. By combining these techniques, the model captures the complex spatial and multivariate dynamics of the local real estate market.

Key words: *Real State Valuation, Multiple Linear Regression Model, Spatial Analysis, Geostatistics, Ordinary Kriging.*

1. Introducción

La Revolución Industrial trajo consigo una *gran revolución urbana* ante la necesidad de albergar masiva y lo más adecuadamente posible a la población que emigraba del campo a las ciudades con el objeto de trabajar (Cárdenas, E., 2012). Al pasar de los años, factores como el acelerado crecimiento demográfico y la magnitud de crecimiento actual de las ciudades, han convertido el compromiso de garantizar el bienestar de la población en todo un desafío (Gavrilidis *et al.*, 2019). Hoy en día, aproximadamente el 55% de la población mundial vive en ciudades y, acorde a los datos del Banco Mundial (BM), para el 2050 se prevé que dicha población alcance casi el 70%; suceso verdaderamente alarmante que se ve reflejado en la demanda de viviendas asequibles que se ajusten a las exigencias de los usuarios en la actualidad.

Lo anterior justifica el planteamiento del presente estudio que pretende desarrollar un modelo que permita estimar el valor de mercado de las viviendas

unifamiliares del municipio de Guadalajara, Jalisco, México, mediante la aplicación de dos técnicas estadísticas:

1. El análisis estadístico multivariado (Regresión Lineal Múltiple).
2. El análisis estadístico espacial (Kriging Ordinario).

Se elaboró una base de datos precisa mediante la recopilación y homogenización de información espacial disponible en las plataformas de Catastro e del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Esta base de datos se utilizó para obtener la categorización de variables a nivel de manzana que influyen en los aprecio de las viviendas. Luego, se utilizó un análisis estadístico para estimar un modelo de predicción de precios de las viviendas basado en estas mismas variables.

Se emplearon herramientas informáticas avanzadas como IBM SPSS Statistics v26 y Statgraphics 18-X64 para llevar a cabo estudios estadísticos a gran escala. Estas herramientas, junto con los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como ArcMap 10.5, demostraron su interoperabilidad, lo que permitió analizar, crear, editar y compartir información de manera integrada. Este enfoque facilita la comunicación de resultados de investigación de manera comprensible para usuarios no expertos en el tema.

1.1 Marco teórico contextual

Desde el 2000 el crecimiento demográfico nacional en México supera los 100 millones de habitantes, concentrándose principalmente en los mayores centros urbanos del país (Cárdenas, E., 2012). Sin embargo, la problemática actual en materia de desarrollo urbano resulta del incumplimiento de la normatividad vigente por parte de las organizaciones constructoras que se empeñan en la construcción masiva de edificios de alta densidad sin las respectivas ampliaciones y/o adecuaciones de equipamientos y servicios públicos correlativos (Roggema, R., 2016).

El Área Metropolitana de Guadalajara (AMG), localizada en la parte central del estado de Jalisco, está actualmente conformada por nueve municipios: San Pedro Tlaquepaque, Tonalá, Zapopan, Tlajomulco de Zúñiga, El Salto, Juanacatlán, Ixtlahuacán de los Membrillos, Zapotlanejo y Guadalajara (Figura 1).

El AMG es consolidada como la segunda aglomeración del país en términos de intercambio comercial y volumen de producción industrial. Lo que la convierte en el principal centro de actividades económicas del estado y del occidente del país. No obstante, la urbanización que se ha producido, como proceso de expansión por parte de Guadalajara y su área conurbada, ha sido muy precipitada, desarticulada, desequilibrada y carente de una adecuada planificación (Colunga, 2002).

En el municipio de Guadalajara se asienta la capital del estado de Jalisco y de la centralidad del AMG. En materia demográfica, acorde a los datos del censo 2020 de las áreas metropolitanas de Jalisco, el municipio resultó ser el segundo más poblado del AMG con 1'385,629 habitantes. El crecimiento urbano del

municipio de Guadalajara ha sido impactado por el auge inmobiliario, causante de la conurbación de las poblaciones de los municipios periféricos, multiplicando el número de asentamientos (ONU-Habitat, 2016). En el municipio destacan los grandes desarrollos habitacionales de vivienda media e interés social que carecen de los equipamientos y servicios, por lo que su diseño no corresponde al de una ciudad tradicional (Figura 2).

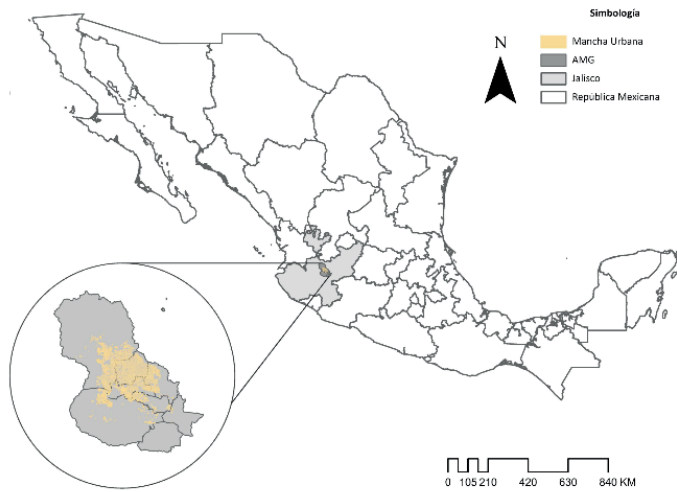


Figura 1. Localización del Área Metropolitana de Guadalajara en México.

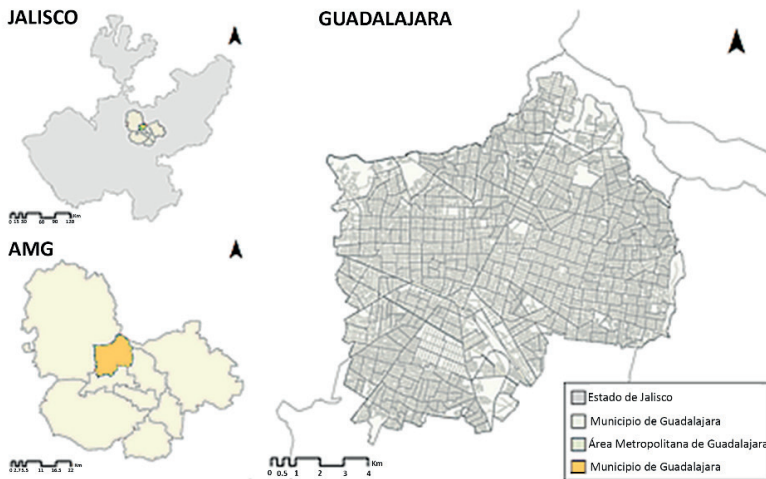


Figura 2.- Ubicación del área de estudio a nivel estatal, área metropolitana y municipal.

2. Metodología

El presente estudio combina técnicas estadísticas, que operan sin datos georreferenciados, y geoestadísticas, que incorporan información espacial, para estimar el valor de las viviendas y analizar su distribución en el municipio de Guadalajara, Jalisco, México. En primer lugar, se homogenizaron los datos descargados del Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco (IIEG) e INEGI. Posteriormente, se verificó la integridad de los datos en Excel después de unificar la información en un SIG. Se analizaron las variables y los datos en IBM SPSS Statistics 26 para obtener un estudio descriptivo, bivariado y un Modelo de Regresión Lineal Múltiple (RLM) sobre las características de las viviendas en Guadalajara. Además, se llevó a cabo un análisis espacial mediante la autocorrelación de los precios de las viviendas y se aplicó el modelo de interpolación espacial Kriging Ordinario (KO) en ArcMap 10.5 para identificar las áreas residenciales con mayor plusvalía en el municipio.

El flujo de trabajo desarrollado para efectos de este estudio se ilustra en la Figura 3.

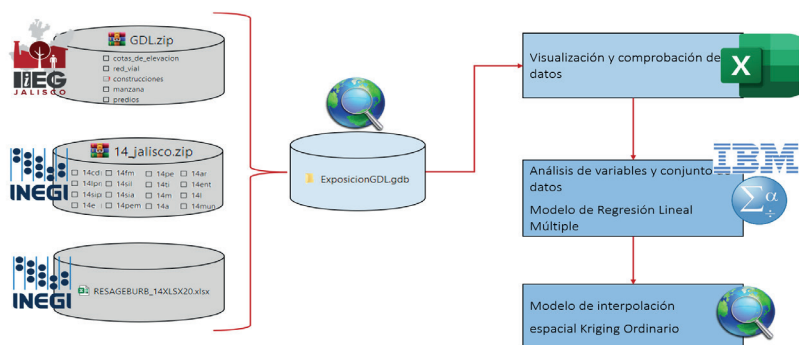


Figura 3. Diagrama del flujo de trabajo para el desarrollo del presente estudio.

A continuación, se detallan los principios fundamentales de las técnicas estadísticas empleadas.

2.1 Regresión Lineal Múltiple

El análisis de regresión es una herramienta útil para identificar y comprender las relaciones entre una variable dependiente y un conjunto de variables independientes. Este método permite estimar los valores de la variable dependiente, representada como “y”, en función del rango de valores de las variables independientes, representadas como “x” (Maulud *et al.*, 2020).

En este estudio, se implementó un Modelo de Regresión Múltiple (RLM). Técnica estadística que predice el comportamiento de una variable dependiente a partir de múltiples variables explicativas. Su objetivo principal es modelar la relación lineal entre las variables independientes (“x”)

y la variable dependiente (“y”), proporcionando una base para su análisis e interpretación (Maulud *et al.*, 2020).

El modelo básico de MLR se expresa mediante la Ecuación 1:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_m x_m + \epsilon \quad (1)$$

Donde ϵ es el término independiente, $\beta_1, \dots, \beta_m$ representan los coeficientes asociados a cada variable independiente ($x_1, \dots, x_m$), y ϵ corresponde al término de error, que captura la variabilidad no explicada por el modelo.

Es importante destacar que los valores empleados en la interpolación espacial mediante el Kriging Ordinario (KO) provienen directamente de los datos originales de precios de las viviendas. Estos valores fueron interpolados para modelar la distribución espacial de las viviendas en el municipio de Guadalajara. Aunque el RLM permitió analizar las relaciones entre las variables explicativas y los precios de las viviendas, sus resultados no se utilizaron como atributos para el modelo de KO. Ambas técnicas se utilizaron de manera complementaria: la RLM para comprender las variables que influyen en los precios de las viviendas y el KO para identificar patrones espaciales en su distribución.

2.2 Kriging ordinario

El método de Kriging ordinario es una técnica de interpolación espacial que permite estimar los valores de una variable en ubicaciones no muestreados (Porras Velázquez, 2017). Este proceso de estimación se basa en el cálculo de las covarianzas (variogramas) entre los datos en los puntos de observación, considerando la correlación espacial entre ellos. El método puede entenderse como una regresión espacial múltiple descrita mediante el siguiente algoritmo:

$$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(S_i) \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1$$

Donde $\hat{Z}(S_0)$ es el datum estimado en la ubicación (S_0), λ_i son los pesos asignados a cada observación y $Z(S_i)$ son los datos disponibles para realizar la estimación. Este algoritmo, predice el valor de un punto, basado en el valor de los puntos más cercanos (Morillo *et al.*, 2020).

2.3 Creación de la base de datos

A través del portal de Cartografía y Ortofotos del IIEG, se descargaron los ficheros en formato *shapefile* de la cartografía de Catastro Guadalajara, actualizados en 2017. Por otra parte, el Marco Geoestadístico del Censo de Población y Vivienda 2020, también en formato *shapefile*, fue descargado del portal del INEGI. Mientras que, los principales resultados del Censo de Población y Vivienda por

Área Geoestadística Básica (AGEB) y manzana urbana 2020, fueron descargados del Sistema de Consulta de Integración Territorial (SCITEL) del INEGI.

Para unificar los datos obtenidos de Catastro con los obtenidos del Censo de Población y Vivienda por AGEB y manzana urbana 2020, se descargó, del SCITEL, el Marco Geoestadístico del Censo de Población y Vivienda 2020, que comprende un conjunto de archivos digitales en formato *shapefile* que permitieron la unificación de los datos dentro de un SIG conforme a la información de AGEB y manzana respectivamente que coincidían con los identificadores dados por los resultados del Censo de Población y Vivienda 2020 por parte del INEGI.

Para cumplir con el objetivo del estudio, tras la descarga y exploración de los datos de partida por AGEB se consideraron de interés la obtención de las siguientes variables:

Área aproximada en m² de cocina

1. Calidad de construcción
2. Cantidad de baños
3. Cantidad de cuartos
4. Cantidad de dormitorios
5. Distancia al centro de la ciudad
6. Material de cubierta
7. Material de suelo
8. Niveles
9. Promedio de ocupantes por vivienda
10. Servicios:
 - a. Energía eléctrica
 - b. Suministro de agua
 - c. Tipo de almacenamiento de agua
 - d. Tipo de desecho de residuos
11. Superficie total construida
12. Valor Fiscal de la vivienda en pesos MXN

Para su obtención, se recurrió a un largo proceso de homogenización de los datos dentro de la herramienta ArcMap y Excel en paralelo. Como resultado del proceso anterior, se obtuvo el tabulado correspondiente a las características de las viviendas en la que cada una de las columnas representa cada variable mencionada al inicio del apartado y que, una vez exportada en formato .xls se procede a su análisis dentro de la herramienta IBM SPSS Statistics. La base de datos constó de la descripción detallada de 140,092 elementos referentes a las viviendas habitadas del municipio de Guadalajara, Jalisco, México.

3. Descripción de los datos

Se recopiló un conjunto de datos para valorar edificios en la zona de estudio, centrándose en describir brevemente sus características para desarrollar un modelo de regresión lineal. Este modelo permitirá estimar los precios de las viviendas utilizando estadística inferencial. Se empleó estadística descriptiva al

conjunto de datos, detallando la estructura y tipos de variables en la Tabla 1, junto con posibles medidas resumen para su descripción.

Tabla 1. Tabla descriptiva de la estructura del conjunto de datos utilizado

<i>Tipo de variable</i>	<i>Etiqueta</i>	<i>Nombre abreviado</i>	<i>Tipo de medida</i>
Cualitativa	Categorías	Material de la cubierta de la vivienda	Techumbre_A
		Material del piso/suelo de la vivienda	TipoPisoB
		Existencia del servicio de energía eléctrica en la vivienda	EnergíaEle
		Método de desecho de residuos de la viv	DesechoRes
		Existencia del servicio de suministro público de agua	Suministro
		Calidad de la construcción de la vivienda	Cal
		Tipo de almacenamiento de agua	Almacenami
Cuantitativas	Discretas	Pisos con los que cuenta la vivienda	Nivel
		Promedio de ocupantes por vivienda	Prom_Ocu2
		Cantidad de dormitorios por vivienda	Dormitorio
		Cantidad de baños	No_Baños
		Área aproximada en m2 de la cocina	Area_Cocin
		Número de cuartos dentro de la viv.	Cuartos_1
	Continuas	Superficie Total Construida	SCT
		Valor en pesos MXN de la vivienda	ValorFisca
		Distancia aproximada en m al centro de la ciudad de Guadalajara	Distance

Fuente: elaboración propia.

Dada la extensión de la base de datos inicial, con 140,092 viviendas, se redujo la muestra al 80% mediante un Muestreo Aleatorio Simple (MAS) utilizando software especializado. El propósito es simplificar el trabajo y generalizar los resultados al total de viviendas del municipio.

Se parte el estudio estadístico clásico con el análisis descriptivo de los datos cualitativos. Del que se asume que al menos el 99% de las viviendas cuentan con los servicios básicos de energía eléctrica, suministro público de agua, así como el servicio de drenaje como método de desecho de residuos. No obstante, se observa también que el 92% de las viviendas mantiene al menos un tinaco como tipo de almacenamiento de agua, mientras que el 8% restante de las viviendas estudiadas cuenta con cisterna. En paralelo, el material de cubierta que predomina sobre las viviendas estudiadas es el concreto, seguido de lámina. Respecto al material de piso/suelo de las viviendas, se concluye que la

mayoría de éstas tiene como material alguno distinto a tierra. De la calidad se obtiene que aproximadamente el 60% de la muestra cuenta con una calidad de construcción medio, seguido del tipo económico con el 30% de la totalidad de viviendas.

Del análisis exploratorio de las variables cuantitativas se asume que, de la muestra la mayoría de las viviendas se encuentran distribuidas en un único nivel sobre rasante. La media de dormitorios corresponde a dos por vivienda y que el 98% de las viviendas cuenta con 20 o más cuartos referentes a los espacios habitables dentro de la vivienda. Se concluye también, que la cantidad de baños por vivienda oscila en dos baños y que la superficie aproximada de las cocinas en las viviendas del municipio es de 5 m². De la superficie total construida de las viviendas se obtuvo que la media es de 209 m² y el valor medio de las mismas oscila entre \$1'256,530 MXN. Por último, de la variabilidad de los datos, se obtiene que las variables superficie total construida y valor en pesos MXN de la vivienda son aquellas que presentan una mayor variabilidad; mientras que, las variables restantes mantienen una variabilidad moderada a excepción de las variables respecto a los cuartos y dormitorios con los que la vivienda cuenta, que presentan una variabilidad casi nula al resultar el valor de su coeficiente de variabilidad próximo a 0.

4. Análisis estadístico multivariado para la estimación del precio de la vivienda

Para la valoración de bienes inmuebles en Guadalajara, Jalisco, México, se utiliza un RLM que considera múltiples características de las viviendas. Este modelo se crea en dos fases: primero, se seleccionan y analizan las variables relevantes, dividiendo la muestra en subgrupos de entrenamiento (80% de los datos) y validación (20% de los datos restantes). Luego, se ajusta el mejor RLM en el subgrupo de entrenamiento y se evalúa su rendimiento en el subgrupo de validación utilizando el Error Cuadrático Medio (RMSE).

Tras el análisis de correlación entre el precio y las demás variables, y considerando todas las pruebas realizadas para encontrar el mejor modelo, se proponen las siguientes variables independientes para la elaboración del modelo de regresión lineal multivariante en este estudio:

1. Logaritmo Neperiano de la superficie total construida.
2. Promedio de ocupantes por vivienda.
3. Distancia aproximada al centro de la ciudad de Guadalajara.

Del modelo propuesto con dichas variables como predictores, se obtiene un valor de correlación aproximado $R=0.78$ y un coeficiente de determinación $R^2=0.61$.

De acuerdo a los coeficientes no estandarizados (B) obtenidos del modelo de RLM, descritos en la Tabla 2, el modelo resulta ser:

$$\text{Precio de la vivienda} = e^{10.20+0.81(\text{LnSuperficie})-0.18(\text{Promedio de ocupado})-9.715\text{E}6(\text{Distancia al centro})}$$

Tabla 2. Tabla de coeficientes del modelo de regresión lineal múltiple obtenido

	Coeficientes						
	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	Estadísticas de colinealidad	
	B	Desv. Error	Beta			Tolerancia	VIF
(Constante)	10.212	0.014		754.250	0.000		
Logaritmo neperiano de la superficie total construida	0.810	0.002	0.749	396.238	0.000	0.972	1.029
Promedio de ocupantes por vivienda	-0.185	0.002	-0.168	-81.563	0.000	0.814	1.228
Distancia aproximada al centro de la ciudad de Guadalajara	9.708E-06	0.000	0.028	12.643	0.000	0.809	1.237

a. Variable dependiente: Logaritmo Neperiano del valor de la vivienda.

Fuente: elaboración propia.

Cabe mencionar que, en el modelo se utiliza el exponencial debido a que la variable dependiente fue transformada al Logaritmo Neperiano de sus valores, siendo la interpretación de los coeficientes del modelo:

1. 10.20: valor en donde la función corta en el eje Y.
2. 00.81*LnSuperficie: por cada m², el LnValor de la vivienda aumentará 00.81.
3. -0.18*Promedio de ocupantes: por cada ocupante, el LnValor de la vivienda disminuirá 0.18.
4. 9.708E-6*Distancia al centro de la ciudad: por cada m, el LnValor de la vivienda aumentará 9.708E-6.

4.1 Capacidad predictiva del modelo

Una vez obtenido el Modelo de Regresión Múltiple para estimar los precios de las viviendas en Guadalajara, Jalisco, México, se evalúa su capacidad predictiva mediante el valor R² y el cálculo del RMSE, que representa la precisión del modelo. Un RMSE menor indica una mayor precisión, ya que representa la raíz cuadrada de la media de los residuos al cuadrado. (Montgomery *et al.*, 2003).

Tabla 3. Tabla resumen del proceso para el cálculo del RMSE durante la primera fase

	N	Media	RMSE
Residuos al cuadrado	112,138	0.1529	0.3910

Fuente: elaboración propia.

Acorde al resultado obtenido del RMSE se demuestra que el modelo cuenta con una capacidad predictiva favorable al ser su valor cercano a 0. No obstante, al analizar el gráfico de dispersión entre el valor estimado del modelo y el valor real obtenido de la variable independiente del modelo: LnValor, se observa como los valores siguen una distribución creciente positiva, afirmando que la capacidad predictiva del modelo es favorable (Bency *et al.*, 2017) (Figura 4).

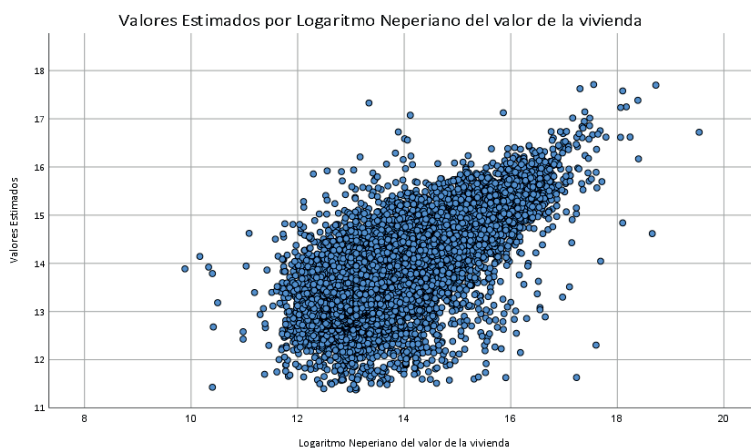


Figura 4. Gráfico de dispersión del valor estimado del modelo y LnValor.

Como se anticipó en la introducción del presente apartado. La estimación del precio de las viviendas del municipio de Guadalajara, Jalisco consiste en la aplicación del modelo al subgrupo denominado "Validación" con la intención de evaluar el ajuste del mismo al comparar el RMSE obtenido durante la primera fase y el que se obtuvo en la segunda fase del proceso. Siendo éste el que orienta realmente la capacidad predictiva del modelo, dado que se aplica el modelo a los precios de las viviendas que no se han utilizado para la realización del modelo.

Se realizaron 10 subgrupos de validación aleatoriamente sobre los que se calculó su RMSE para comprobar si existía mucha variabilidad entre los mismos. (Tabla 4).

Como se puede observar los RMSE de los subgrupos de validación están alrededor de 0.39 (hay poca variabilidad entre ellos), similares al subgrupo de entrenamiento (RMSE entrenamiento= 0.39), por lo que permite decir que el RLM es válido para predecir precios de las viviendas dentro de la zona de estudio.

Cabe resaltar que, a pesar de que la capacidad predictiva del modelo resultara favorable, al comprobar los supuestos del mismo (linealidad, independencia, normalidad de los errores, homocedasticidad y no colinealidad), el modelo no cumple con ellos. No obstante, la validez del modelo se justifica en que el

número de las viviendas seleccionadas para construirlo es muy próximo a la totalidad de las viviendas de la zona.

Tabla 4. Tabla resumen del proceso para el cálculo del RMSE durante la segunda fase

Núm. Validación	Núm.	Media	RMSE
0	27,666	0.1560	0.3950
1	27,941	0.1545	0.3931
2	27,666	0.1560	0.3950
3	27,963	0.1533	0.3915
4	27,996	0.1530	0.3912
5	28,253	0.1527	0.3908
6	27,796	0.1518	0.3896
7	28,127	0.1533	0.3915
8	28,129	0.1582	0.3977
9	28,166	0.1553	0.3941

Fuente: elaboración propia.

5. Análisis estadístico espacial para la estimación del precio de la vivienda en el municipio de Guadalajara, Jalisco (México)

La geoestadística ofrece ventajas para la interpolación espacial al proporcionar no solo una superficie de predicción, sino también medidas de certeza o precisión (Pérez, J., 1992). El método de KO se basa en la correlación espacial entre los puntos de muestra para explicar la variación sobre la superficie. Se inicia con el cálculo de la autocorrelación espacial mediante la creación de variogramas y luego se realizan predicciones de los valores desconocidos. El modelado del semivariograma es crucial para la predicción espacial, ya que indica la autocorrelación espacial de los datos (Oliver, 1990).

Ahora bien, es preciso enfatizar que el precio de las viviendas no sigue una distribución normal por lo que se aplicó la transformación logarítmica a dicha variable previo al estudio del supuesto de la normalidad.

5.1 Interpolación por Kriging Ordinario

Los datos cumplen con los supuestos para la elaboración de la interpolación por KO. Por lo que, luego de probar con los cinco tipos de semivariogramas que el software ArcMap 10.5 pone a disposición (Esférico, Gaussiano, Circular, Exponencial y Stable), se observó que los resultados obtenidos eran muy similares entre sí; tanto en las características de los semivariogramas, como en los resultados del error de predicciones. Sin embargo, de la comparación de los modelos, se concluye que el modelo Stable, ofrece una mejor interpolación dado que su RMSE es, aunque por poco, inferior al ofertado por los demás.

5.2 Resultados

La representación de los valores de las viviendas tras la interpolación espacial de los datos se hace por clasificación en cinco categorías.

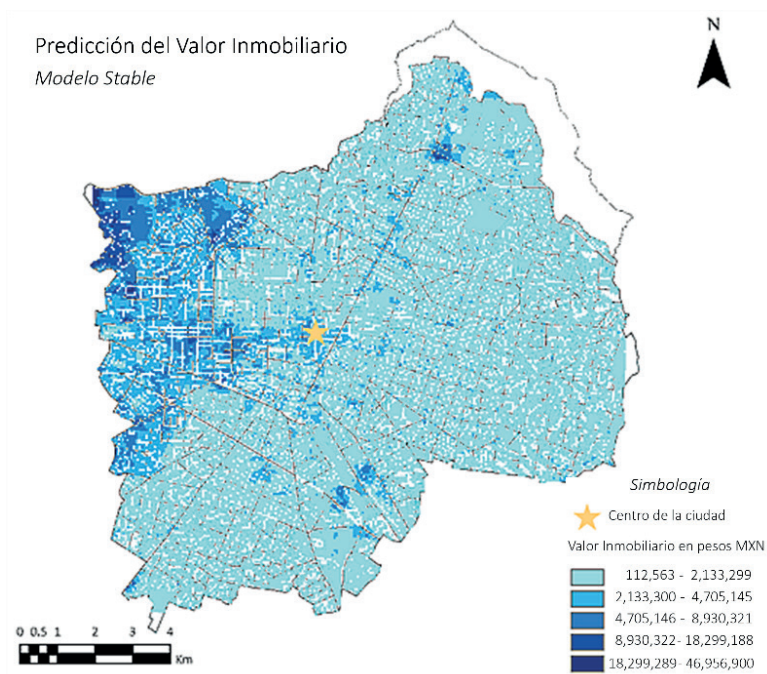


Figura 5. Cartografía resultante de la interpolación de los datos por Kriging Ordinario, bajo el modelo STABLE.

En el modelo seleccionado (Stable) la categoría más económica incluye las viviendas con valor aproximado entre \$112,563 y \$2'133,299 MXN; seguida de la categoría en la que los precios de las viviendas oscilan entre los \$2'133,300 y \$4'705,145 MXN; la tercer categoría corresponde a las viviendas en las que su valor se encuentra entre \$4'705,146 y \$8'930,321 MXN; seguida de las viviendas con valor inmobiliario entre \$8'930,322 y \$18'299,188 MXN; mientras que la última categoría agrupa al resto de viviendas que superan el valor de \$18'299,188 MXN.

Del mapa obtenido tras la interpolación espacial de los datos por KO, y comprobando los datos con el mapa de errores correspondiente, se observa que, los inmuebles con mayor valor inmobiliario se agrupan al poniente del municipio de Guadalajara (1). Mientras que, los más baratos, que además son mayoría, se encuentran distribuidos en el resto del municipio, con mayor abundancia hacia el oriente.

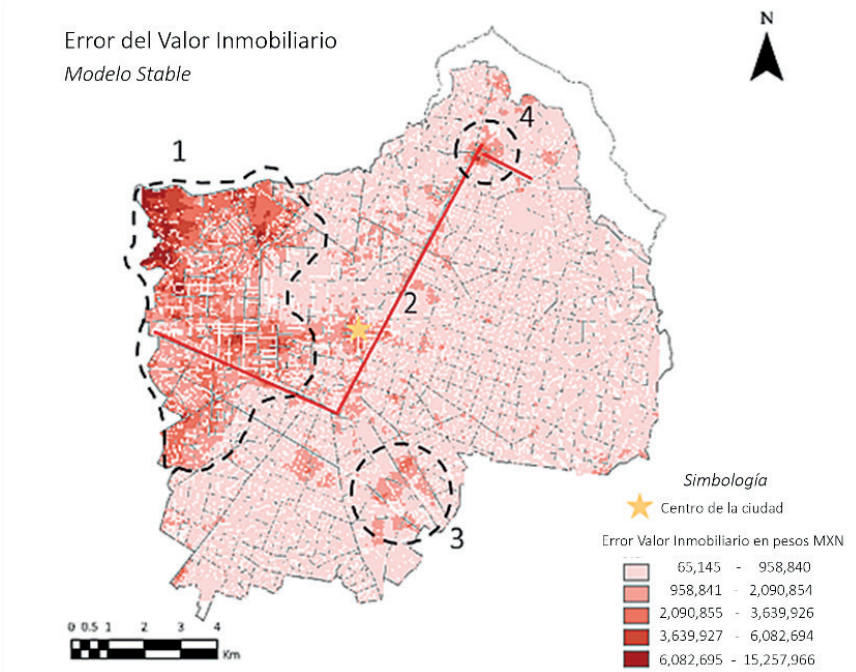


Figura 6. Análisis de la cartografía de errores resultante de la interpolación de los datos por Kriging Ordinario, bajo el modelo STABLE.

En paralelo, se observa que, sobre el eje central NE-SO de la ciudad, marcado por la vialidad correspondiente a La Calzada Independencia, los precios de las viviendas son un poco más elevados que el resto a su alrededor, perteneciendo a la segunda y tercera categoría de valores (2). Se observa también, al sureste de la ciudad, próximo a la frontera del municipio, una pequeña agrupación de viviendas con valores altos respecto a sus vecinos (3). Este mismo fenómeno se obtiene al norte, en el que se observa una ligera mancha oscura que identifica la existencia de viviendas con valor inmobiliario máximo (4).

Por otra parte, el precio de las viviendas próximas al centro de la ciudad de Guadalajara mantiene valores promedios que oscilan entre la segunda y tercera categoría de valores en ambos resultados.

Sin más, se concluye que la colindancia con el municipio de Zapopan, al poniente de la ciudad, influye evidentemente en el precio de las viviendas. Esto se debe a que, en la actualidad, Zapopan es el municipio líder en atracción de inversión del Estado de Jalisco; siendo un punto de atracción, también, para el desarrollo de fraccionamientos residenciales que regularmente son de ingreso medio y medio alto.

Del mismo modo, se deduce que las vialidades principales dentro de la localidad, juegan un papel importante en la determinación del valor del precio

de la vivienda, dado que, es sobre los principales ejes viales de la ciudad en donde se encuentran viviendas con mayor precio que sus vecinos circundantes.

El fenómeno de agrupación al norte de la ciudad se liga estrechamente con la conurbación de dos vialidades importantes conocidas como La Calzada Independencia (NE-SO) y Periférico Norte (NO-SE); así como con la existencia de equipamientos importantes como el Zoológico, escuelas, clínicas municipales, centros comerciales y un par de centros universitarios.

No obstante, el valor elevado de las viviendas al suroriente de la ciudad se justifica al considerar que esta zona trata del ingreso principal al municipio de Guadalajara, siendo también, la más próximas al Aeropuerto Internacional de Guadalajara Miguel Hidalgo y Costilla.

6. Conclusiones

La presente investigación compone una serie de análisis para la estimación de los precios de las viviendas que podrían ser aplicables en investigaciones futuras dentro del municipio de Guadalajara, Jalisco (México).

El estudio demostró que la combinación de la Regresión Lineal Múltiple (RLM) y el kriging Ordinario (KO) es efectiva para analizar y visualizar las tendencias del mercado inmobiliario en el municipio.

Por una parte, la RLM permitió identificar las variables más relevantes, como la superficie construida y la distancia al centro, mientras que el KO permitió visualizar la distribución espacial de los precios, destacando la concentración de viviendas de mayor valor en la zona poniente del municipio, evidenciando la influencia de inversión por el municipio colindante de Zapopan, Jalisco.

Aunque los resultados son valiosos, y las técnicas utilizadas son herramientas útiles, es necesario incorporar más indicadores, como calidad de infraestructura y acceso a servicios, para desarrollar un índice de valoración más completo y preciso. Debido a que, en la actualidad la recopilación y homogenización de la información disponible en las plataformas de Catastro e INEGI resulta una tarea complicada, se considera que ambas instituciones podrían trabajar en una unificación de sus datos con la intención de facilitar el proceso de análisis de trabajos similares al presente documento. Por otra parte, la información que ambas instituciones ponen a disposición funciona como los engranes de un reloj para llevar a cabo estimaciones valorativas de bienes inmuebles. Siendo los resultados, información de interés que posteriormente puede ser propuesta para la toma de decisiones gubernamentales que centren su actuación en la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos. Por lo tanto, se pretende potencializar la aplicación de este tipo de investigaciones a proyectos futuros que involucren la valoración de edificaciones habitacionales dentro de la República Mexicana con intención de mejorar y homogeneizar el método de valoración existente, partiendo de la creación de modelos similares para los municipios aledaños a Guadalajara, incluidos en el AMG.

Bibliografía

- Alexandru Gavrilidis, A., Nita, M. R., Onose, D. A., Badiu, D. L. & Nastase, I. I. (2019). Methodological framework for urban sprawl control through sustainable planning of urban green infrastructure. *Ecological Indicators*, 96, 67-78. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.10.054>
- Bency, A. J., Rallapalli, S., Ganti, R. K., Srivatsa, M. & Manjunath, B. (2017). Beyond spatial auto-regressive models: Predicting housing prices with satellite imagery. *Proceedings of the IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision*, 320-329. <https://doi.org/10.1109/wacv.2017.42>
- Banco Mundial (2020). Desarrollo Urbano: Panorama General. Banco Mundial. <https://www.bancomundial.org/es/topic/urbandevelopment/overview#1>
- Cárdenas Elorduy, E. (2012). *Historia del desarrollo y la planeación, urbanos, en México*. Asociación Mexicana de Urbanistas, A. C. <https://urborb.files.wordpress.com/2014/05/amu-ece-his-des-pla-urb-mex-edi-vir-050112.pdf>
- Catastro Guadalajara (2021). Tabla de Valores 2021. Gobierno del Estado de Jalisco, México.
- Congreso del Estado de Jalisco (2010). Código urbano para el Estado de Jalisco. Gobierno del Estado de Jalisco. México. <https://periodicooficial.jalisco.gob.mx/seccion/tipos/catastral/39>
- Contreras Echeverría, A. (2016). Estudio para la clasificación en geogrupos según el confort de las viviendas del barrio de Las Acacias (Madrid) con técnicas del análisis multivariante y el análisis espacial [Proyecto Fin de Máster]. *ETSI en Topografía, Geodesia y Cartografía*, UPM. <https://oa.upm.es/43248/>
- Dolores Redondas, M. (2010). Análisis Multivariante. E. U. Arquitectura Técnica. UPM o Gómez Orea, D. (1993). *Ordenación del Territorio: una aproximación desde el medio físico*. Editorial Agrícola Española. España
- ESRI (2016). Cómo funciona Kriging. ArcGIS for Desktop. <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/how-kriging-works.htm>
- Garnier-Villarreal, M. (2022). Introducción al análisis geoestadístico de datos en geociencias: teoría y aplicación. *Revista Geológica de América Central*. <https://doi.org/10.15517/rgac.v67i0.51474>
- Gobierno del Estado de Jalisco (2020). Área Metropolitana de Guadalajara. <https://www.jalisco.gob.mx/es/jalisco/guadalajara>
- González Ruiz, R. M. (2019) [La localización en el valor urbanístico del suelo rural: la accesibilidad a núcleos de población. Tesis doctoral, E.T.S. Arquitectura] UPM. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.57443>
- Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco (IIEG) (2017). Cartografía y Ortofotos del Estado de Jalisco. https://iieg.gob.mx/ns/?page_id=161
- Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco (IIEG). (2019). Zapopan, diagnóstico municipal. <https://iieg.gob.mx/ns/wp-content/uploads/2019/06/Zapopan.pdf>
- Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco (IIEG). (2021). Oferta de vivienda en los principales municipios del Área Metropolitana de Guadalajara. https://iieg.gob.mx/ns/?page_id=11967
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). Marco Geoestadístico. Censo de Población y Vivienda 2020. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463807469>

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, SCITEL). (2020). Principales resultados por AGEB y manzana urbana 2020.
<https://www.inegi.org.mx/app/scitel/Default?ev=10>
- Dastan Hussen Maulud & Adnan Mohsin Abdulazeez (2020). A Review on Linear Regression Comprehensive in Machine Learning. *Journal of applied Science and Technology Trends*. <https://doi.org/10.38094/jastt1457>
- Morillo, M. C., Martínez-Cuevas, S., García-Aranda, C., Molina, Í., Querol, J. J. & Martínez, E. (2022). Spatial analysis of the particulate matter (PM10): An assessment of air pollution in the region of Madrid (Spain): Spatial interpolation comparisons and results. *International Journal of Environmental Studies*.
<https://doi.org/10.1080/00207233.2022.2072585>
- Morillo, M. C., Martínez-Cuevas, S., Molina Sánchez, Í., García-Aranda, C. & Martínez Izquierdo, M. E. (2018). Artificial neural networks and geostatistical models for housing valuations in urban residential areas. *Geografisk Tidsskrift - Danish Journal of Geography*. <https://doi.org/10.1080/00167223.2018.1498364>
- Morillo, M. C., García Cepeda, F. & Martínez-Cuevas, S. (2017). The application of spatial analysis to cadastral zoning of urban areas: An example in the city of Madrid. *International Journal of Environmental Studies*.
<https://doi.org/10.1080/00396265.2015.1113029>
- Morillo, M. C., García-Cepeda, F., Martínez-Cuevas, S., Molina, Í. & García-Aranda, C. (2016). Geostatistical study of the rural property market applicable to the region of Murcia (Spain). *Applied Spatial Analysis and Policy*.
<https://doi.org/10.1007/s12061-016-9200-8>
- Montgomery, D. C., Runger, G. C. & Hubele, N. F. (2003). *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería*, 2a. ed., Limusa Wiley.
- Navidi, W. (2006). *Estadística para ingenieros y científicos*, 3a. ed., McGraw-Hill Interamericana.
- Giraldo Henao, R. (NA). *Introducción a la Geoestadística*. Universidad Nacional de Colombia. Geoinnova. https://geoinnova.org/wp-content/uploads/2021/08/LIBRO_-DE_-GEOESTADISTICA-R-Giraldo.pdf
- Oliver, M. A. (1990). Kriging: A method of interpolation for geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Systems*, 4 (3), 313-332.
- ONU-Hábitat. (2016). Índice básico de las ciudades prósperas. Informe final municipal: Guadalajara.
<https://docplayer.es/51516009-Guadalajara-jalisco-mexico-cpi-informe-final-municipal-escala-global-de-prosperidad-moderadamente-debil.html>
- Pérez Brito, J. (1992). [Predicción espacial a través del Método de Kriging Ordinario. Tesis, Facultad de Ciencias] Universidad Autónoma de México.
<http://132.248.9.195/pmig2016/0187820/0187820.pdf>
- Porras Velázquez, G. (2017). Método Kriging de inferencia espacial. Diplomado en Análisis de Información Geoespacial. CentroGeo, CONACYT. <https://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1012/160/1/16-M%C3%A9todo%20Kriging%20de%20Inferencia%20espacial%20-%20Diplomado%20en%20An%C3%A1lisis%20de%20Informaci%C3%B3n%20Geoespacial.pdf>
- Quevedo Medina, U. D. (2017). [Aplicación del análisis espacial y estadístico al estudio del mercado de bienes inmuebles. El caso de Madrid, Trabajo fin de Máster]. ETSI en Topografía, Geodesia y Cartografía, UPM.

- Redondas, M. D. (2010). *Análisis Multivariante. E. U. Arquitectura Técnica*. UPM.
- Rodríguez Ojeda, L. (2017). *Probabilidad y estadística básica para ingenieros*. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Instituto de Ciencias Matemáticas.
- Roggema, R. (2016). The future of sustainable urbanism: a redefinition. *City Territ Archit* 3, 22. <https://doi.org/10.1186/s40410-016-0052-y>
- Salas Tafoya, J. M. (2015). El modelo de valuación inmobiliaria en México. *RIDE Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=498150318003>
- Seguí Cortés, D. (2017). *[Estimación de un modelo de precios hedónicos para viviendas localizadas en el casco urbano de la ciudad de Altea (Alicante)]* [Trabajo Fin de Máster]. Universidad de Alicante. <http://hdl.handle.net/10045/75067>
- Secretaría General del Gobierno del Estado de Jalisco (2001). Reglamento Estatal de Zonificación. Gobierno del Estado de Jalisco, México. <https://transparencia.info.jalisco.gob.mx/sites/default/files/Reglamento%20Estatal%20de%20Zonificacion.pdf>
- Secretaría General del Gobierno del Estado de Jalisco (2001). Reglamento de Catastro para el municipio de Guadalajara. Gobierno del Estado de Jalisco, México. https://info.jalisco.gob.mx/sites/default/files/leyes/reglamento_de_la_ley_de_catastro_municipal_del_estado_de_jal.pdf
- Secretaría General de Gobierno del Estado de Jalisco (2020). Periódico Oficial. Gobierno del Estado de Jalisco, México. <https://periodicooficial.jalisco.gob.mx/>