

Modelo de predicción del crecimiento urbano en el estado de Nuevo León, México

Prediction model of urban growth in the state of Nuevo León, México

Refugio Chávez-Hernández*

José Luis Martínez-Flores**

Claudia Malcón-Cervera**

Patricia Cano-Olivos**

**Universidad de Monterrey, Nuevo León, México*

***Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, Secretaría de Ciencia,
Humanidades, Tecnología e Innovación del Estado de Puebla, México*

Resumen

Este estudio establece un marco de referencia para identificar un modelo predictivo del crecimiento urbano y su orientación para la proyección de reservas de territorio para una organización inmobiliaria en el estado de Nuevo León, México. El estudio está enfocado en un algoritmo de modelación de regresión lineal y polinómica utilizando los datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). La información de entrada son datos históricos de los años 1970 a 2010, los cuales se utilizaron para realizar proyecciones del año 2020, los resultados se comparan con el reporte de 2020 presentados por INEGI para identificar la precisión del modelo. La metodología incluye tres etapas: preparación de datos, modelación de datos en *Python*, y la interpretación de resultados. Se encontró una relación de coincidencia de 90.6 por ciento, la modelación final se completó hasta el año 2040, los resultados muestran una distribución de crecimiento con alto porcentaje de incremento en el área metropolitana; de 25.45 por ciento en 2030, y 75.72 por ciento en 2040. Por último, el estudio recomienda la orientación geográfica en la búsqueda de reservas para la planeación futura de obras.

Palabras clave: Crecimiento urbano; modelo de regresión; predicción; uso de suelo.

Abstract

This study establishes a reference framework to identify a predictive model of urban growth and its orientation for the projection of land reserves for a real estate organization in the state of Nuevo León, Mexico. The study is focused on a linear and polynomial regression modeling algorithm using data from the National Institute of Statistics and Geography (INEGI). The input information is historical data from the years 1970 to 2010, which was used to make projections for the year 2020, the results are compared with the 2020 report presented by INEGI to identify the accuracy of the model. The methodology includes three stages: data preparation, data modeling in *Python*, and interpretation of results. A coincidence relationship of 90.6per cent was found, the final modeling was completed until the year 2040, and the results show a distribution of growth with a high percentage of increase in the metropolitan area; 25.45per cent in 2030, and 75.72per cent in 2040. Finally, the study recommends geographic orientation in the search for reserves for future planning of works.

Keywords: Urban growth; regression model; prediction; land use.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento acelerado de los centros urbanos es un fenómeno que se caracteriza por concentrar la mayor parte de la industria de transformación en expansión, ya que los empleadores y comercios se han trasladado fuera del centro, lo que favoreció el incremento de la población en las ciudades aledañas, esto tiene como consecuencia una mayor expansión de la zona periférica (Aguilar, 1999). Es muy importante para las sociedades actuales y futuras que el crecimiento urbano se produzca de forma óptima, maximizando los beneficios para la población en general y minimizando los costos tanto económicos como medioambientales (Mandelas, 2007).

Los estudios sobre el crecimiento urbano atrajeron una atención considerable durante las dos últimas décadas (Wahyudi, 2013), especialmente porque las áreas urbanas se están expandiendo constante y rápidamente en todo el mundo. La tarea de gestionar el crecimiento urbano aumentó tanto en alcance como en complejidad y se convirtió en uno de los retos más importantes del siglo XXI (Thapa, 2012) bajo el tema del cambio ambiental global principalmente; en este caso el objetivo es identificar las zonas con mayor probabilidad de poblarse para ser adquiridas como reservas de terreno con fines de construcción de viviendas.

Pronosticar la magnitud y localización de la expansión urbana son conceptos claves para la planeación de la ciudad, pues permiten cuantificar las necesidades futuras y los costos de diversos servicios públicos como salud, educación y vivienda, así como riesgos medioambientales. De la misma manera se enriquecen los escenarios para la accesibilidad de empleos, cambios en la demanda, necesidades de transporte y flujos de tráfico (Suárez, 2007). El análisis y seguimiento a detalle de los cambios en la expansión o crecimiento en el uso del suelo requieren de una cantidad sustancial de datos. El uso de herramientas tecnológicas como la teledetección o técnicas de posicionamiento espacial como la georreferenciación permiten, de manera más amplia, la obtención de los datos (Araya, 2010).

En México hoy en día la urbanización se convirtió en una tendencia global que afecta a la mayoría de los ciudadanos, no solo del país, sino del mundo. El 55 por ciento de la población mundial vive actualmente en las ciudades y las estadísticas pronostican que para el año 2050 los centros urbanos tendrán que acoger aproximadamente a 70 por ciento de la población mundial. El 78 por ciento de los mexicanos vive en ciudades, la población

urbana se duplicó en los últimos 30 años y desde entonces la superficie urbana creció siete veces su tamaño (Rojas, 2020).

El estado de Nuevo León ocupa el segundo lugar en el índice de competitividad estatal en México, por lo tanto es uno de los más importantes para el país. Cuenta con una población económicamente activa de 2.54 millones de personas, es la tercera economía del país al aportar 7.6 por ciento del PIB nacional, lidera las actividades secundarias del país, así como el sector de la construcción, es la tercera entidad con más empleos generados y con mayor captación de inversión extranjera (Bárceñas, 2020). Durante las últimas tres décadas la capital del estado, Monterrey, y su área metropolitana experimentaron una urbanización rápida y descontrolada. El crecimiento de la mancha urbana consume recursos naturales como tierras agrícolas, paisajes naturales, cerros y faldas de las montañas. En este estudio se eligió a Nuevo León para predecir su crecimiento urbano futuro debido a la importancia de lo que representa el estado y la relevancia de su entorno industrial.

El aumento de población en las últimas décadas indica que el estado de Nuevo León se volvió mucho más poblado en el área metropolitana que en el resto del estado, siendo el principal factor de urbanización y cambio de uso del suelo en Nuevo León (Seto, 2002). Muchas investigaciones se han centrado en los cambios en el uso del suelo urbano (Xiao, 2005), ya que los ecosistemas urbanos están fuertemente afectados por las actividades humanas y tienen una estrecha relación con la vida de la población (Stow, 2002).

El crecimiento exponencial de habitantes en el estado de Nuevo León generó un aumento significativo en la demanda de viviendas. Entre el año 2015 y 2020 la población en el estado fue en aumento y, en solo cinco años, subió 13 por ciento. La población de Nuevo León para el año 2023 asciende a 5,784,442 habitantes, aproximadamente el crecimiento anual en los últimos años se estima en 133 mil habitantes según el censo 2020 realizado por el Consejo Nacional de Población (CONAPO).

Tener una oportunidad de crecimiento económico y demográfico, como se presenta en el estado de Nuevo León, hace que las empresas del ramo de la construcción de viviendas realicen proyectos de inversión en un horizonte a largo plazo sobre la adquisición de lotes para uso residencial, las decisiones de seleccionar los terrenos adecuados y minimizar el riesgo de perder los millones de pesos invertidos en gastos de urbanización e infraestructura que el mercado no adquiriera como se estimaba la venta de la casa habitación, más grave aún, que la zona desarrollada no sea de interés

y quede obsoleta o abandonada. Esto es una preocupación latente para los constructores y para muchos de ellos se ha vuelto realidad, ello como consecuencia de la falta de alineación al plan de desarrollo urbano por parte del gobierno, lo que eleva las consecuencias de una mala selección de las zonas de desarrollo, más aún si las decisiones se toman de manera empírica o basadas en percepciones sin fundamentos.

Investigadores en la industria de la construcción afirman que hoy existen pocos desarrolladores en el país con planes de expansión definidos para sus proyectos, ya que, en la mayoría de los casos, estos se construyen en terrenos heredados de generaciones anteriores. Esta es una restricción importante dado que, por lo general, las tierras no son adecuadas y es necesario hacer lo mejor que se pueda con la ubicación que se tiene. Este es solo un ejemplo de porqué los desarrolladores necesitan comenzar a planear estrategias a largo plazo para su crecimiento y búsqueda de terrenos con mejores condiciones de desarrollo, considerar las tendencias de la expansión industrial y las necesidades de los consumidores, de lo contrario se corre el riesgo de un muy posible fracaso. Es alarmante la falta de planeación estratégica a largo plazo por parte de muchos constructores, sobre todo por el costo de cometer errores en cuanto a la localización de nuevos proyectos.

En este trabajo se considera un modelo de estimación del crecimiento de la vivienda en el estado de Nuevo León, el cual permita predecir en diferentes periodos de tiempo el número de viviendas para cada uno de los municipios que lo componen, apoyado de técnicas de tendencias que aporten información y que permitan la visualización de la dirección de la expansión urbana, proporcionando información a quienes toman decisiones, en una empresa del ramo de la construcción, en la selectividad de lotes residenciales para la construcción de nuevas viviendas.

METODOLOGÍA

La metodología de este estudio se presenta en tres etapas: la primera etapa considera la preparación y procesamiento de datos extraídos del Censo de Población y Vivienda 2020 de la plataforma de INEGI, específicamente del reporte *Panorama Sociodemográfico de Nuevo León*, y que se relacionan con los factores que reflejan el crecimiento urbano. En la segunda etapa se realiza la modelación de datos, así como la estimación de la precisión de sus resultados, teniendo como base la información estructurada de la primera etapa al utilizar el modelo de regresión lineal y polinomial, el modelo se realizó con el programa *Python* y tiene como objetivo predecir el crecimiento de la vivienda en el futuro para cada municipio del estado de Nuevo

León. En la tercera etapa se presenta la visualización de los resultados para cada uno de los periodos de tiempo estimados con el modelo de regresión en cada municipio y el estado en general.

En esta sección se presenta brevemente la técnica estadística utilizada para analizar el crecimiento de la vivienda en los municipios de Nuevo León. Básicamente los modelos desarrollados se pueden dividir en dos tipos: basados en procesos y basados en datos. Entre los modelos basados en procesos se encuentran los Autómatas Celulares (CA por sus siglas en inglés), desde 1980 se desarrollaron numerosos modelos utilizando este método para simular el crecimiento urbano (Santé, 2010). Los CA constituyen un posible enfoque para la modelización del crecimiento urbano mediante la simulación de procesos espaciales como un sistema discreto y dinámico en el espacio y el tiempo (Alkheder, 2008).

Por su parte, la regresión se basa en datos y es un método común para predecir y determinar las relaciones entre los usos del suelo urbano y las variables independientes (Fang, 2004). Los modelos de regresión lineal, polinómica y logística se han utilizado ampliamente en la modelización del crecimiento urbano, acomodando variables socioeconómicas y ambientales independientes (Poelmans, 2009).

Los modelos de regresión lineal se utilizan frecuentemente en múltiples disciplinas, incluidas las ciencias de la medicina, la ingeniería, pronósticos del mercado de valores, el sector energético, por mencionar algunas. En este trabajo se consideran ciertas preocupaciones sobre el uso de la herramienta propuesta con el fin de facilitar el análisis de resultados por personal que no domina los fundamentos estadísticos de estos modelos. En la revisión de la literatura algunos autores utilizan y proponen una gama amplia de programas para realizar análisis de regresión lineal. Estas herramientas incluyen funciones matemáticas que deben escribirse y ejecutarse para realizar análisis de regresión. Además, comprender los resultados generados por estas herramientas no siempre es factible para usuarios no expertos. Los investigadores también han aplicado técnicas estadísticas normales para derivar manualmente el modelo de regresión lineal que mejor se ajusta, lo que demanda mucho tiempo y suele ser complejo (Roy, 2022).

En este estudio se propone un modelo realizado en el lenguaje de programación *Python*. Esta herramienta semi-automatizada propuesta para el análisis de regresión lineal será de gran ayuda en estos escenarios donde se podría ahorrar tiempo y esfuerzo para la estimación del número de viviendas para cada municipio del estado, otra ventaja es la facilidad en la interpretación de los resultados del análisis para usuarios no expertos. Se

examinó la regresión lineal y polinómica por la disponibilidad de información en la base de datos del INEGI para identificar el modelo predictivo del crecimiento de la vivienda para cada uno de los 51 municipios del estado de Nuevo León, México, dando mayor énfasis a los resultados presentados en la zona del área metropolitana.

MARCO TEÓRICO

Regresión lineal y polinómica

La regresión es una técnica estadística que intenta estimar la fuerza y la naturaleza de la relación entre una variable dependiente y una serie de variables independientes. Los análisis de regresión pueden ser lineales y no lineales. Una regresión se llama lineal cuando es lineal en los parámetros: $y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon$, para $i = 1, 2, \dots, n$ donde y es la variable de respuesta, x denota la variable independiente, β_0 es el intercepto y otras β s se conocen como pendiente (Sharma, 2020).

En el caso de ajustar mejor una curva a los datos, una alternativa es ajustar un polinomio a los datos usando la regresión polinomial, en la que la relación entre la variable independiente y las variables dependientes se modela como un polinomio de orden n . Se ajusta a una relación no lineal entre las variables observadas; pero, como problema de estimación estadística, es lineal porque la función de regresión es lineal en los parámetros de regresión desconocidos. El objetivo del análisis de regresión es modelar el valor esperado de una variable dependiente y en términos del valor de una variable independiente (o vector de variables independientes) x . En general, el valor esperado de y como un polinomio de orden n , que produce el modelo de regresión polinomial general, se puede expresar de la siguiente manera: $y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_1^2 + \dots + \beta_n x_1^n + \varepsilon$, $\varepsilon \sim (0, \sigma^2)$, para $i = 1, 2, \dots, n$ (Montgomery, 2012).

Medición de la precisión del modelo

Es importante disponer de una medición de la precisión del pronóstico o proyección que se obtiene de los modelos, esta medición juega un papel importante dado que nos permite observar el error del pronóstico debido a la variabilidad e incertidumbre, el error de la proyección o precisión se obtiene de la diferencia entre el valor real y el valor pronosticado para un periodo específico.

El error cuadrático medio MSE es un estimador imparcial de la varianza σ^2 del término de error aleatorio y se define en la ecuación:

$$MSE = \frac{SSE}{df_E} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - (k + 1)}$$

Donde y_i son los valores observados $\hat{y}_i$ son los valores ajustados de la variable dependiente Y para el i -ésimo caso. Dado que el error cuadrático medio es el promedio del error cuadrático, donde el promedio se realiza dividiendo por los grados de libertad, el MSE es una medida de qué tan bien se ajusta la regresión a los datos. La raíz cuadrada de MSE es un estimador de la desviación estándar σ del término de error aleatorio. El error cuadrático medio $RMSE = \sqrt{MSE}$ no es un estimador imparcial de σ , pero sigue siendo un buen estimador. MSE y RMSE y son medidas del tamaño de los errores en la regresión y nos dan una indicación sobre el componente explicado del ajuste de regresión (Aczel, 2006).

El error porcentual absoluto medio MAPE es la medida más útil para comparar la precisión de los pronósticos entre diferentes artículos o productos, ya que mide el rendimiento relativo (Makridakis, 1997). Es una medida de precisión comúnmente utilizada en los métodos cuantitativos de pronóstico. Esta medida se define en la ecuación:

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right|$$

Si el valor calculado por MAPE es inferior a diez por ciento, se interpreta como un pronóstico excelente y preciso, entre diez y 20 por ciento de pronóstico bueno, entre 20 y 50 por ciento es un pronóstico aceptable y más de 50 por ciento es un pronóstico inexacto (Lewis, 1982).

El R-cuadrado R^2 (coeficiente de determinación) de la regresión múltiple es similar a la regresión simple donde el coeficiente de determinación R^2 se define como:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

Donde SST es la suma total de cuadrados y $\bar{y}$ es la media aritmética de la variable Y . R^2 mide el porcentaje de variación en la variable de respuesta Y explicada por la variable explicativa X . Por lo tanto, es una medida importante de qué tan bien se ajusta el modelo de regresión a los datos. El

valor de R^2 siempre está entre cero y uno, $0 \leq R^2 \leq 1$. Un valor de R^2 de 0.9 o superior es muy bueno, un valor superior a 0.8 es bueno y un valor de 0.6 o superior puede ser satisfactorio en algunas aplicaciones, aunque debemos ser conscientes de que, en tales casos, pueden producirse errores en la predicción. Cuando el valor de R^2 es 0.5 o inferior, la regresión explica solo 50 por ciento o menos de la variación de los datos; por lo tanto, la predicción puede ser pobre (Ostertagová, 2011).

Área de estudio

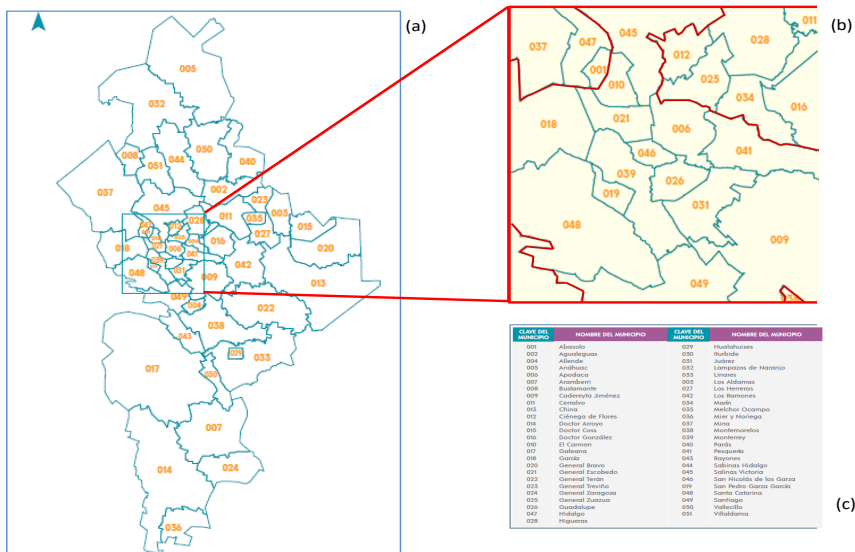
El área de estudio es el estado de Nuevo León, México, ubicado en el noroeste del país, limitando al norte con el río Bravo que lo separa de Estados Unidos, al este con Tamaulipas, al sur con San Luis Potosí y al oeste con Coahuila y Zacatecas. Se divide en 51 municipios: Apodaca, Cadereyta Jiménez, García, General Escobedo, Guadalupe, Salinas Victoria, El Carmen, Juárez, San Nicolás de los Garza, San Pedro Garza García, Santa Catarina, Santiago y considerando Pesquería por su crecimiento, junto con Monterrey, forman la Zona Metropolitana de Monterrey, la cual juega un papel de gran importancia en la economía del estado y del país. El resto de los municipios son Abasolo, Agualeguas, Los Aldamas, Allende, Anáhuac, Aramberri, Bustamante, Cerralvo, Ciénega de Flores, China, Doctor Arroyo, Doctor Coss, Doctor González, Galeana, General Bravo, General Terán, General Treviño, General Zaragoza, General Zuazua, Los Herreras, Higueras, Hualahuises, Iturbide, Lampazos de Naranjo, Linares, Marín, Melchor Ocampo, Mier y Noriega, Mina, Montemorelos, Parás, Los Ramones, Rayones, Sabinas Hidalgo, Hidalgo, Vallecillo y Villaldama (INEGI, 2020).

La distribución territorial del estado está conformada por 64,156.2 km², que representa 3.3 por ciento del territorio nacional, la densidad de población es de 90.2 habitantes por km², cuenta con 1,655,256 viviendas particulares habitadas, lo que representa 4.7 por ciento del total nacional; en promedio, cada vivienda cuenta con 3.5 ocupantes, 99 por ciento de las viviendas cuentan con disponibilidad de servicios básicos como energía eléctrica, drenaje, sanitario y agua entubada (INEGI, 2020).

Según el reporte del Censo de Población y Vivienda 2020 de INEGI, en el año 2020 el estado de Nuevo León, México, ocupó el séptimo lugar a nivel nacional por su número de habitantes. Entre los años 2000 y 2020 la población fue en aumento y, en veinte años, ascendió en 50.8 por ciento, mientras que en el lustro de 2015 a 2020 el incremento fue de 13.1 por ciento. La población de Nuevo León para el año 2020 asciende a 5,784,442

habitantes, el crecimiento anual se estima en 133 mil habitantes, dado lo anterior se considera un crecimiento exponencial de habitantes en el estado de Nuevo León y este impacto generó un aumento significativo en la demanda de viviendas, servicios públicos, vialidades, transporte, entre otros (INEGI, 2020).

Figura 1: Ubicación del área de estudio: (a) mapa de la división administrativa del estado de Nuevo León, (b) área metropolitana de Monterrey y (c) claves y nombres de los 51 municipios del área de estudio



Fuente: INEGI 2020.

Datos

La disponibilidad de datos precisos, fiables y de calidad son importantes para el éxito de una investigación. En México, el INEGI pone a disposición pública un volumen considerable de información histórica y actual con suficiente nivel de detalle para que la sociedad realice análisis y estudios, en este caso para el análisis de la urbanización de los estudios espaciales urbanos y la planeación urbana futura. Los datos que se requieren y se recopilan incluyen datos históricos sobre el comportamiento en el crecimiento de la vivienda desde el año 1970 a 2020 en el estado; en la Tabla 1 se desglosa la información para los municipios que conforman el Área Metropolitana de Monterrey.

Tabla 1: Población y vivienda del área metropolitana de Monterrey

Municipio	Longitud	Latitud	Km ²	Densidad	Población total	Vivienda total	Ocupación vivienda	Vivienda servicios básicos
Apodaca	-100.189	25.781	224.00	2,930.64	656,464	212,801	651,904	181,334
Cadereyta Jiménez	-100.002	25.591	1,140.90	107.23	122,337	55,231	120,302	36,672
El Carmen	-100.317	25.854	104.30	1,001.71	104,478	38,780	104,368	29,667
García	-100.430	25.781	1,032.00	384.89	397,205	157,779	397,103	114,108
San Pedro Garza García	-100.402	25.665	70.80	1,866.79	132,169	41,237	131,749	36,261
General Escobedo	-100.323	25.808	149.40	3,220.97	481,213	154,216	480,588	130,256
Guadalupe	-100.260	25.677	118.40	5,431.95	643,143	207,183	642,036	181,618
Juárez	-100.091	25.646	247.30	1,906.68	471,523	181,463	471,395	133,558
Monterrey	-100.311	25.665	324.40	3,523.41	1,142,994	368,796	1,138,867	324,521
Pesquería	-100.054	25.783	322.80	457.32	147,624	57,402	147,587	43,320
Salinas Victoria	-100.243	25.913	1,667.40	52.04	86,766	36,175	86,737	25,126
San Nicolás de los Garza	-100.290	25.755	60.10	6,858.55	412,199	133,725	411,924	121,534
Santa Catarina	-100.462	25.674	915.80	334.49	306,322	90,966	306,133	81,705
Santiago	-100.105	25.480	739.20	63.29	46,784	20,785	46,504	13,872

Fuente: INEGI 2020.

Dado que este estudio se enfoca en simular la expansión urbana sobre el crecimiento de la vivienda, los datos solo se limitan a este uso. Para desarrollar los modelos de estimación utilizando el análisis de regresión se usaron variables seleccionadas y recopiladas como fuerzas impulsoras del crecimiento de la vivienda, las cuales son: total de las personas que residen, total de viviendas con servicios públicos, personas que residen en viviendas, densidad de población y el área geográfica, desglosadas y estructuradas por cada uno de los 51 municipios.

Modelación de datos

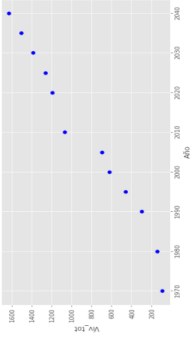
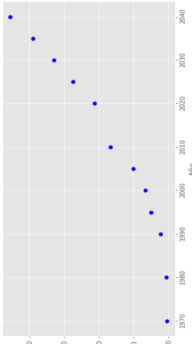
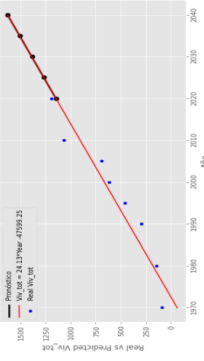
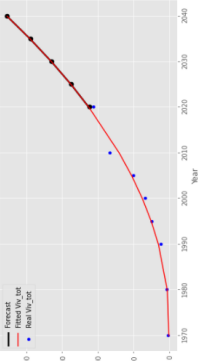
En esta etapa primeramente se importa al programa *Python* la base de datos estructurada que contiene la información histórica, el siguiente paso es la obtención de gráficas por cada municipio para visualizar los patrones y comportamiento de manera individual con base a la serie temporal sobre la cantidad de viviendas “variable dependiente”, el resultado gráfico de cada municipio se muestra en la Figura 2.

Una vez que se obtuvo la gráfica de todos los municipios de la entidad, se determina el comportamiento del incremento de la vivienda para cada municipio del estado de Nuevo León. Como se puede observar, hay gráficas que muestran la pendiente más lineal y otras con una proyección más curva, esta es la base principal para determinar qué método se utilizará para la estimación en la proyección del crecimiento para cada municipio, asignando el modelo de regresión polinómica a los municipios con la línea de tendencia curva y el modelo de regresión lineal a los municipios donde la línea de tendencia se proyecta más recta.

Con el modelo de regresión configurado y adecuado para cada municipio se calcula su proyección y se evalúa la precisión del modelo estimando el valor de R^2 , el MAPE y el RMSE para cada municipio. En la Figura 3 se muestran los resultados de la ejecución del modelo de regresión, seleccionado solo como ejemplo de la aplicación del modelo para los municipios de Abasolo y Apodaca, en el caso del municipio de Abasolo la línea de tendencia tiene una proyección más recta, por lo que se considera el modelo de regresión lineal para la estimación futura del crecimiento de la vivienda, el valor de R^2 arroja un valor de 0.9739, lo que logra demostrar que el modelo de regresión permite explicar con seguridad la asociación de las variables independientes sobre la cantidad de viviendas que se pronostican para el municipio de Abasolo, un valor del MAPE de 24.5 por ciento y un valor de RMSE de 84.17.

Fuente: elaboración propia.

Figura 3: Estimación del crecimiento de la vivienda en los municipios de Abasolo y Apodaca para los años 2020, 2025, 2030, 2035 y 2040

Regresión lineal		Regresión polinómica	
Municipio	Abasolo	Apodaca	
Gráfica de comportamiento			
Estimación del número de vivienda para periodos de cinco años			
Precisión del modelo	$R^2 = 0.9739829908390727$ $MAPE = 24.50100234190121$ $RMSE = 84.1743496863782$	$R^2 = 0.9962462795737199$ $MAPE = 14.11309226558786$ $RMSE = 9246.449698696257$	

Fuente: elaboración propia.

En el caso del municipio de Apodaca la gráfica toma una proyección de la línea más curva, por lo que se considera el modelo de regresión polinomial y arroja un valor de R^2 de 0.9962, al igual que el caso del municipio de Abasolo, el valor de R^2 para el municipio de Apodaca se considera bueno, lo que permite asumir que las variables independientes proporcionan la suficiente variación para explicar la cantidad de viviendas, se presenta un valor del MAPE de 14.11 por ciento y un valor de RMSE de 9,246.44.

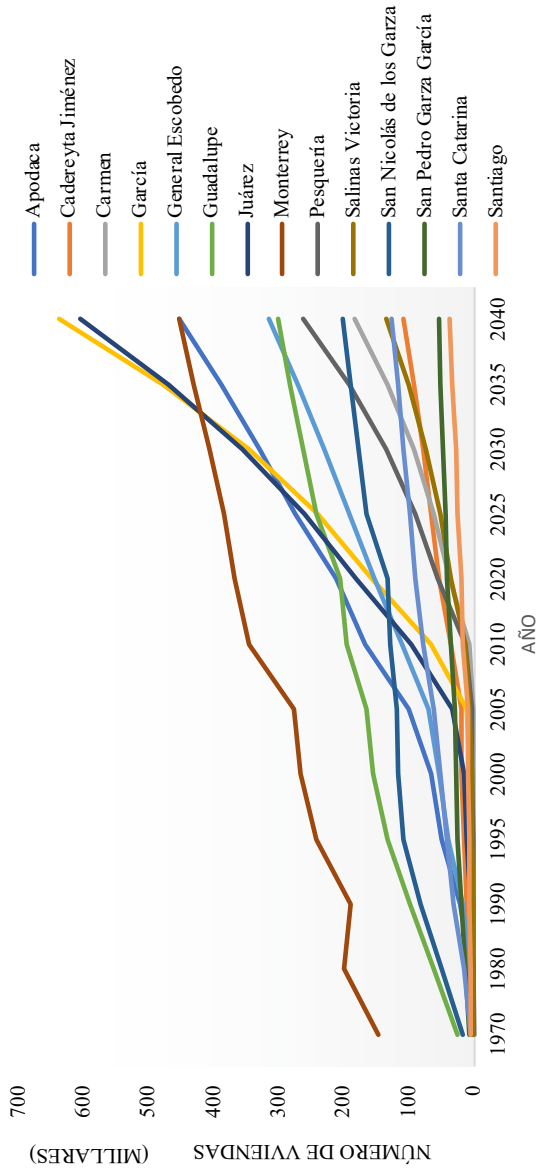
En el caso del municipio de Apodaca se presenta un porcentaje de error más bajo que en el caso de Abasolo, pero sobre el error del RMSE se puede mostrar un valor mucho más alto en el número de viviendas, esto debido a que Apodaca es uno de los municipios pertenecientes al Área Metropolitana de Monterrey, por lo tanto la cantidad de viviendas es mucho mayor y su proyección es más compleja de estimar por la proporción de su crecimiento a través de los últimos años y la disponibilidad de reservas de terreno.

Los modelos también nos permiten identificar y estimar la orientación de la mancha urbana en el estado de Nuevo León a partir de los resultados obtenidos, por una parte es relevante conocer que entre 85.5 y 86.2 por ciento del crecimiento de la vivienda se dará dentro del Área Metropolitana de Monterrey en los próximos 20 años, pero se destaca que municipios como García y Juárez concentrarán la mayor cantidad de viviendas, lo que superará a municipios como Monterrey, Apodaca, Guadalupe y Escobedo. En la Figura 4 se puede observar la proyección del número de viviendas para los municipios del área Metropolitana.

Mediante los modelos de pronósticos indicados para cada uno de los 51 municipios según su regresión, se estableció un periodo de transición desde el año 1970 a 2010 como referencia para estimar el crecimiento de la vivienda para cada municipio y en general del estado de Nuevo León para el año 2020, con el resultado se pudo hacer una comparación con los datos reales reportados para el año 2020 sobre el número de viviendas por el INEGI, el comparativo nos permite definir la precisión de los modelos.

El modelo se valida con el año 2020 para comparar el número de viviendas proyectadas y las reales reportadas en la base de datos del INEGI, la proporción de coincidencia del modelo es de 90.6 por ciento sobre el total de viviendas en el estado y de 96.7 por ciento sobre la Zona Metropolitana de Monterrey.

Figura 4: Gráfica de proyección de la vivienda en los municipios del área de Metropolitana de Monterrey



Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 2 se muestra a detalle los valores reales reportados por INEGI para el año 2020 y el resultado estimado sobre el número de viviendas que arrojan los modelos para cada municipio, así como los valores de su precisión. Es importante mencionar que el modelo se calibró para más de un municipio para mejorar la precisión de los resultados de la modelación. Para cada calibración se considera evaluar el resultado de la regresión lineal y polinómica, pero siempre considerando las mismas variables o factores que se encuentran en la base de datos del INEGI y que afectan el crecimiento de la vivienda. La calibración es sencilla en el programa *Python*, una vez que se identifica el comportamiento específico de cada municipio se realiza el ajuste del tipo de modelo que requiere, se corre de nueva cuenta el modelo y se revisa con detenimiento el valor del coeficiente de determinación y los valores del error, siempre se debe considerar el modelo que arroja el menor error y, en su caso, el mayor valor para R^2 .

Tabla 2: Comparativa del resultado de las proyecciones de vivienda y el valor real reportado por el INEGI para el año 2020 en el estado de Nuevo León

Municipio	Actual 2020	Predicción 2020	MAPE	RMSE	R^2
Abasolo	1,194	1,143	4.25%	103.1	0.926
Aguaqueguas	2,971	3,040	2.34%	328.8	0.787
Los Aldamas	1,623	1,624	0.04%	186.5	0.710
Allende	13,785	12,758	7.45%	1228.9	0.885
Anáhuac	8,119	7,548	7.03%	626.1	0.880
Apodaca	212,801	224,481	5.49%	11324.5	0.975
Aramberri	6,145	6,231	1.40%	271.4	0.946
Bustamante	2,389	2,461	3.03%	213.4	0.886
Cadereyta	55,231	53,750	2.68%	2625.1	0.971
Carmen	38,780	37,889	2.30%	1617.0	0.983
Cerralvo	4,283	3,924	8.39%	404.4	0.819
Ciénega	31,005	31,145	0.45%	1022.8	0.989
China	5,543	5,006	9.69%	528.2	0.804
Doctor Arroyo	13,349	13,514	1.24%	416.8	0.967
Doctor Coss	1,246	1,332	6.90%	171.8	0.610
Doctor González	2,106	2,176	3.30%	164.4	0.916
Galeana	16,424	14,353	12.61%	1343.1	0.828
García	157,779	159,344	0.99%	6513.5	0.984
San Pedro	41,237	41,562	0.79%	1221.9	0.986
General Bravo	3,397	3,529	3.87%	283.9	0.869
Escobedo	154,216	158,423	2.73%	4950.5	0.990
General Terán	7,473	7,591	1.57%	337.4	0.936
General Treviño	1,096	1,144	4.42%	114.6	0.787
General Zaragoza	2,437	2,416	0.86%	106.3	0.950
General Zuazua	42,305	43,865	3.69%	3807.9	0.933
Guadalupe	207,183	223,892	8.06%	9320.9	0.976

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2: Continuación

Municipio	Actual 2020	Predicción 2020	MAPE	RMSE	R ²
Los Herreras	1,899	1,990	4.81%	222.2	0.751
Higueras	835	877	5.03%	80.0	0.887
Hualahuises	3,361	3,441	2.37%	173.3	0.946
Iturbide	1,454	1,468	0.98%	41.0	0.979
Juárez	181,463	185,374	2.16%	8410.2	0.980
Lampazos	3,014	3,125	3.67%	258.8	0.863
Linares	31,978	32,543	1.77%	1314.8	0.970
Marín	2,215	2,143	3.27%	182.9	0.920
Melchor Ocampo	921	953	3.52%	84.1	0.876
Mier y Noriega	2,662	2,648	0.52%	37.9	0.993
Mina	2,727	2,827	3.66%	202.3	0.923
Montemorelos	30,139	30,706	1.88%	1440.3	0.963
Monterrey	368,796	362,609	1.68%	19583.3	0.925
Parás	830	865	4.26%	82.8	0.834
Pesquería	57,402	56,465	1.63%	1973.0	0.988
Los Ramones	4,610	4,813	4.41%	391.0	0.884
Rayones	1,675	1,720	2.71%	97.0	0.926
Hidalgo	5,900	5,721	3.03%	321.0	0.955
Salinas	36,175	36,044	0.36%	564.4	0.997
San Nicolás	133,725	152,747	14.22%	11326.0	0.914
Sabinas Hidalgo	16,128	14,915	7.52%	1403.2	0.882
Santa Catarina	90,966	90,209	0.83%	3743.0	0.982
Santiago	20,785	21,427	3.09%	1373.5	0.935
Vallecillo	1,315	1,384	5.25%	155.3	0.734
Villaldama	2,603	2,690	3.34%	188.2	0.898

Fuente: elaboración propia.

Los municipios que forman parte del área Metropolitana, que representan 27 por ciento del total del estado, presentan un coeficiente de determinación mayor a 0.92 y un MAPE por debajo de 8.1 por ciento, a excepción del municipio de San Nicolás de los Garza que presenta un R^2 del 0.914 y un MAPE de 14.22 por ciento, ambos indicadores muestran una precisión buena sobre la proyección de la vivienda para los municipios con mayor demanda, para el resto de los municipios 33 por ciento presenta un R^2 entre 0.91 a 0.99 con un MAPE máximo de 3.66 por ciento, 27 por ciento presenta un R^2 entre 0.80 a 0.89 con un MAPE máximo de 12.61 y 12 por

ciento restante presenta un R^2 entre 0.61 a 0.79 con un MAPE máximo de 6.9 por ciento. Solo en seis municipios el modelo no logró ajustar por encima de 0.8 su coeficiente de determinación, por otra parte al evaluar la cantidad de viviendas que representa esos municipios en el estado en el año 2020 el porcentaje es de tan solo 0.5.

Los resultados obtenidos a través de los modelos de regresión se compararon con las proyecciones municipales realizadas por el CONAPO en su reporte *Reconstrucción y proyecciones de la población de los municipios de México, 2024*, en estas mismas se obtuvo una población estimada de 7,769,371 habitantes en el estado de Nuevo León desglosado por municipio, el resultado del modelo propuesto, aunque su enfoque principal es el de calcular la cantidad de viviendas por cada municipio, puede ajustar su variable de respuesta, pero para esta comparativa se multiplicó el número de viviendas obtenidas por el modelo por municipio por la cantidad de habitantes promedio para el año 2040 (3.1 habitantes según INEGI), dando un resultado de 7,812,106 habitantes, en la Figura 5 se puede observar los resultados por municipio de ambas proyecciones (CONAPO, 2024).

En su reporte, *Conciliación Demográfica de México 1950-2019 y Proyecciones de la Población de México y de las entidades federativas 2020-2070*, CONAPO (2023) indica que en el año 2053 se iniciará el descenso de la población en el país, esta información es de relevancia para determinar y ajustar con base a los reportes generados por INEGI y CONAPO, lo que permitiría parametrizar el modelo y recalculer las necesidades habitacionales en el estado de Nuevo León. De momento, según el reporte de CONAPO (2023), se menciona que Nuevo León incrementará su población al menos hasta el año 2070, tal y como se muestra en la Figura 6, la proporción de la población en Nuevo León crecerá de 4.8 a 6.4 puntos porcentuales del año 2024 a 2070.

La Figura 7 permite visualizar los resultados de la modelación inicial del año 2020 con base en los datos desde 1970 sobre la cobertura de la vivienda en Nuevo León, este paso se considera importante para la verificación del proceso de modelación.

Es aceptable la precisión de los resultados en el modelo de predicción, dado que el modelo incluye solo factores limitados presentes en el reporte del INEGI y que contribuyeron al desarrollo y crecimiento de la vivienda real en el estado.

Figura 5: Comparativa proyección de población municipal 2040 CONAPO y resultados de la modelación propuesta al año 2040

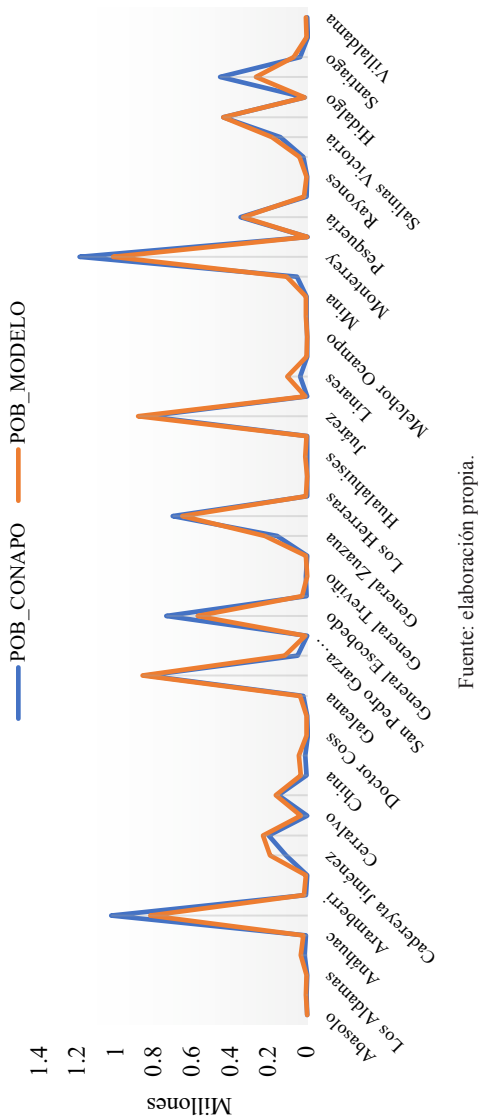
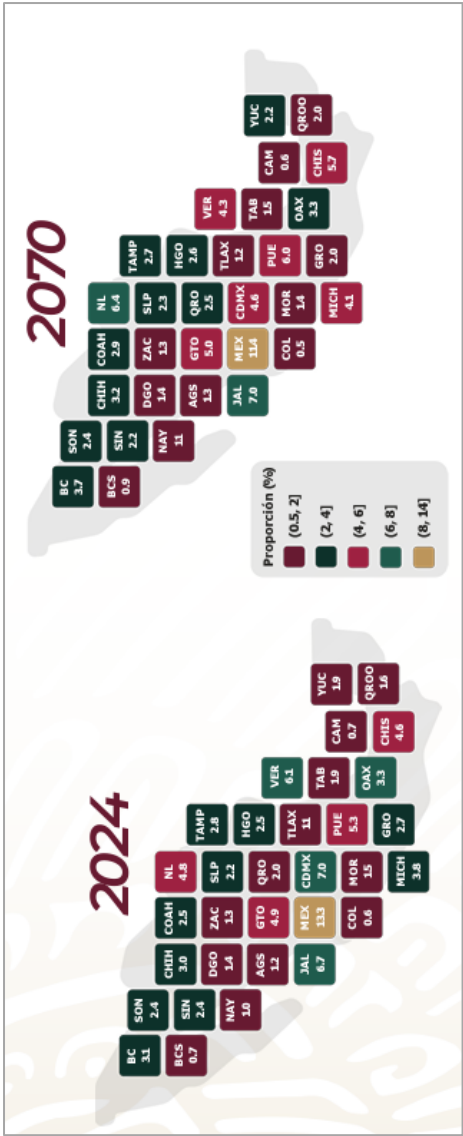


Figura 6: Proporción de población respecto al total del país (2024 al 2070)



Fuente: CONAPO 2023.

Figura 7: Uso real del suelo para vivienda y crecimiento pronosticado por la regresión lineal y polinómica para 2020 en el estado de Nuevo León, México

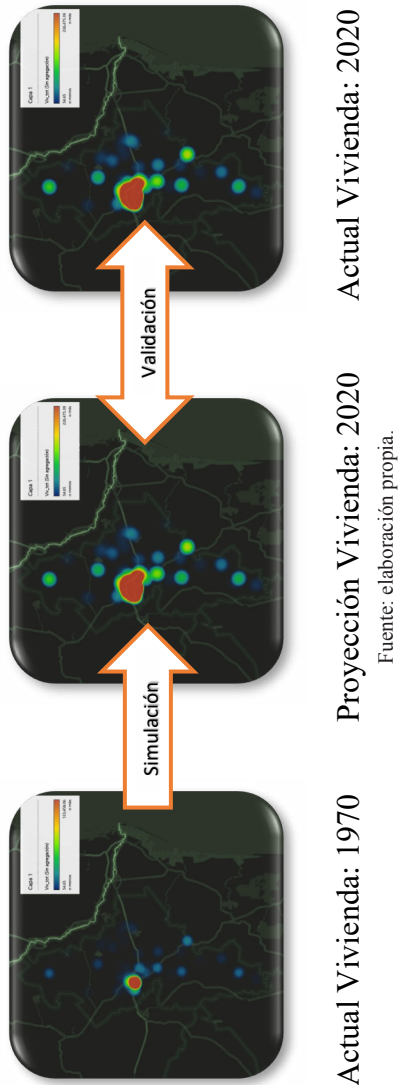
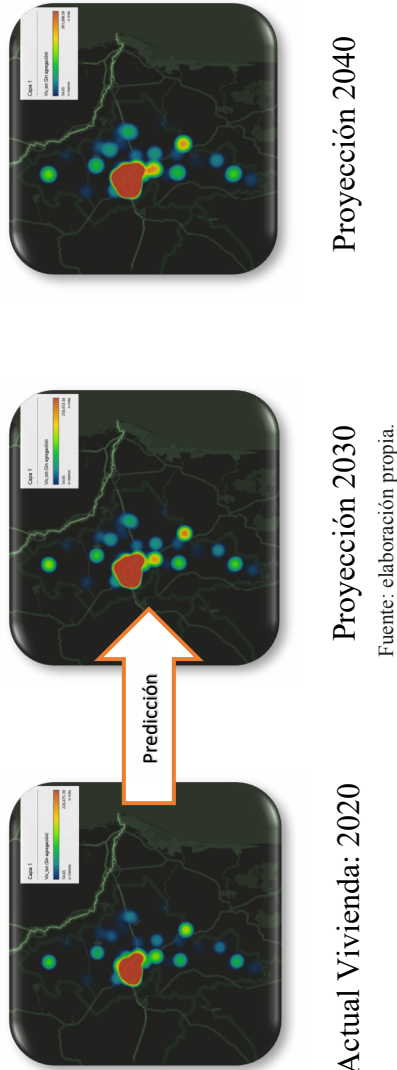


Figura 8: Predicción del crecimiento de vivienda pronosticado por la regresión lineal y polinómica para los años 2030 y 2040 en el estado de Nuevo León, México



Fuente: elaboración propia.

Otros factores como las instalaciones comerciales, industriales, servicios de salud, vialidad y transporte, educativas, recreación y restricciones de zonificación, podrían tener un impacto en el crecimiento de la vivienda, pero no se incluyeron en el modelo de predicción debido a la falta de disponibilidad de datos. Con base en estos hallazgos, y considerando nuestras variables y parámetros, se completó el proceso de predicción para los años 2025, 2030, 2035 y 2040 (Figura 8).

Los resultados muestran un incremento exponencial en los municipios de García, Juárez, Apodaca, Pesquería, Escobedo, El Carmen, Zuazua, Salinas Victoria y Guadalupe, teniendo un crecimiento que va desde 303 por ciento, en el caso del municipio de García, a 45.9 por ciento para el municipio de Guadalupe. Para efectos de este estudio se desea señalar los municipios con mayor interés para el desarrollo de nuevas viviendas.

En la Tabla 3 se muestra en la columna de “Interés” la clasificación de Alto, Medio o Bajo, considerando la cantidad de viviendas pronosticadas en un plazo de 20 años. Para el caso de las zonas marcadas como interés Alto se ubican los municipios donde la cantidad supera las 15 mil viviendas en el plazo mencionado, para la clasificación Medio se consideran los municipios que caen en un rango por encima de las ocho mil viviendas y menor a las 15 mil, y en el caso del grupo de municipios o zonas de interés Bajo tienen una estimación de crecimiento por debajo de las ocho mil viviendas durante los próximos 20 años.

El resultado anterior permite considerar las zonas con mayor potencial para el desarrollo de casas habitación, la intención es que este análisis permita identificar la orientación y facilitar la búsqueda de lotes residenciales para adquirirse con suficiente anticipación, este horizonte permitiría ubicar zonas con mayor posibilidad de venta y mercado para la población del estado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En general para el estudio, los resultados presentados para la predicción del crecimiento de la vivienda demuestran la capacidad del modelo de regresión lineal y polinómica para producir una modelación realista utilizando los datos disponibles por el INEGI. Esto se presenta por la buena precisión lograda en el proceso de validación, como se muestra en la Tabla 2.

La Tabla 3 presenta los resultados del proceso en las proyecciones de la cantidad de viviendas a futuro para cada municipio en periodos de cinco años.

Tabla 3: Resultado de las proyecciones de vivienda para los 51 municipios del estado de Nuevo León para los años 2025, 2030, 2035 y 2040

Municipio	Actual 2020	Pred 2025	Pred 2030	Pred 2035	Pred 2040	Interés
García	157,779	241,051	346,040	477,140	637,180	Alto
Juárez	181,463	261,608	355,966	470,345	606,642	Alto
Apodaca	212,801	274,441	329,414	389,401	454,402	Alto
Pesquería	57,402	90,486	135,429	192,736	263,848	Alto
General Escobedo	154,216	192,621	230,171	271,073	315,327	Alto
El Carmen	38,780	61,680	93,282	133,741	184,103	Alto
General Zuazua	42,305	64,289	90,017	121,642	159,758	Alto
Salinas Victoria	36,175	52,974	74,673	101,724	134,708	Alto
Guadalupe	207,183	243,472	263,053	282,633	302,214	Alto
Ciénega de Flores	31,005	46,687	66,689	91,700	122,268	Alto
Monterrey	368,796	385,226	407,842	430,458	453,075	Alto
San Nicolás	133,725	164,942	177,137	189,332	201,527	Alto
Cadereyta Jiménez	55,231	65,744	79,084	93,771	109,805	Alto
Santa Catarina	90,966	99,253	108,297	117,341	126,385	Alto
Montemorelos	30,139	36,994	44,259	52,563	61,973	Alto
Linares	31,978	37,239	42,173	47,296	52,560	Alto
Santiago	20,785	25,052	28,994	33,242	37,786	Alto
San Pedro	41,237	44,970	48,378	51,786	55,194	Medio
Doctor Arroyo	13,349	16,030	19,050	22,614	26,767	Medio
Cerralvo	4,283	13,885	15,012	16,139	17,267	Medio
China	5,543	13,885	15,012	16,139	17,267	Medio
General Terán	7,473	9,193	11,207	13,683	16,669	Medio
Los Ramones	4,610	5,959	7,289	8,811	10,532	Bajo
Lampazos de Naranjo	3,014	3,936	4,953	6,200	7,700	Bajo
General Bravo	3,397	4,307	5,246	6,363	7,672	Bajo
Aramberri	6,145	7,127	8,122	9,217	10,411	Bajo

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3: Continuación

Municipio	Actual 2020	Pred 2025	Pred 2030	Pred 2035	Pred 2040	Interés
Sabinas Hidalgo	16,128	16,183	17,451	18,719	19,987	Bajo
Allende	13,785	13,885	15,012	16,139	17,267	Bajo
Los Herreras	1,899	2,553	3,261	4,128	5,172	Bajo
Mier y Noriega	2,662	3,220	3,928	4,787	5,812	Bajo
Hualahuises	3,361	4,029	4,693	5,435	6,258	Bajo
Aguaileguas	2,971	3,604	4,237	4,939	5,710	Bajo
Villaldama	2,603	3,216	3,821	4,507	5,280	Bajo
Rayones	1,675	2,189	2,772	3,481	4,328	Bajo
Bustamante	2,389	2,966	3,530	4,154	4,837	Bajo
Mina	2,727	3,304	3,821	4,375	4,963	Bajo
Doctor González	2,106	2,585	3,033	3,518	4,037	Bajo
General Zaragoza	2,437	2,813	3,256	3,747	4,286	Bajo
Galeana	16,424	15,325	16,297	17,269	18,241	Bajo
Hidalgo	5,900	6,208	6,695	7,182	7,669	Bajo
Anáhuac	8,119	8,107	8,665	9,224	9,783	Bajo
Doctor Coss	1,246	1,622	1,971	2,382	2,859	Bajo
Los Aldamas	1,623	1,950	2,325	2,749	3,220	Bajo
General Treviño	1,096	1,399	1,709	2,081	2,519	Bajo
Vallecillo	1,315	1,651	1,962	2,322	2,732	Bajo
Melchor Ocampo	921	1,191	1,479	1,819	2,219	Bajo
Iturbide	1,454	1,659	1,867	2,091	2,333	Bajo
Parás	830	1,035	1,222	1,425	1,644	Bajo
Marín	2,215	2,347	2,552	2,757	2,962	Bajo
Higueras	835	996	1,111	1,218	1,315	Bajo
Abasolo	1,194	1,264	1,385	1,505	1,626	Bajo

Fuente: elaboración propia.

Los resultados muestran que el crecimiento simulado presenta un patrón de crecimiento similar al actual, concentrándose específicamente en el Área Metropolitana de Monterrey en los municipios con mayor expansión en la zona Noroeste con el municipio de García y en la zona Este con el municipio de Juárez con referencia a la ciudad de Monterrey.

De acuerdo con las imágenes de la Figura 8, las áreas urbanas con mayor crecimiento en el número de viviendas se expandirán con mayor proporción a la periferia de la capital del estado (Monterrey), al Este con los municipios de Cadereyta, Pesquería y Juárez, al Norte con los municipios de Salinas Victoria, Ciénega de Flores, El Carmen y General Zuazua, al Noroeste con el municipio de García y General Escobedo, y al Sur con los municipios de Santiago, Morelos y Linares con un crecimiento menos acelerado pero importante.

Es conveniente mencionar que toda esta expansión calculada queda a reserva de ciertos factores relevantes como lo es el uso del suelo para cada municipio, principalmente el de uso agrícola o industrial, dado que las áreas urbanas crecerán a partir de la transformación de áreas que en un principio no están destinadas para el desarrollo de vivienda. Considerando el crecimiento industrial y económico, principalmente en el Área Metropolitana de Monterrey, son factores que detonan un crecimiento urbano más acelerado, es decir, de terrenos urbanizados, lo que provoca un agotamiento del uso del suelo para fines agrícolas en el estado de Nuevo León.

Las ventajas que proveen las estimaciones sobre el pronóstico y dirección del crecimiento para cada municipio del estado de Nuevo León a través del método propuesto son: poder evitar un crecimiento urbano en áreas protegidas o zonas señalizadas de alto riesgo, reducir costos de levantamiento de información al utilizar las bases de datos proporcionadas por el INEGI, análisis rápido y confiable para la evaluación, modificación y gestión de planes de desarrollo urbano por parte del gobierno y particulares.

La calidad del modelo puede verse afectada significativamente por el número de intervalos temporales, la recomendación es realizar ajustes al modelo cada periodo que el INEGI reporte sus resultados y comparar con los resultados del modelo para validar la precisión, en dado caso de que el coeficiente de determinación sea bajo se deben realizar ajustes para mejorarlo.

CONCLUSIONES

Los modelos de pronósticos han hecho un gran aporte para respaldar las decisiones de la planeación urbana. Con la ayuda de los modelos se adquiere conocimiento y comprensión de la dinámica de los sistemas, se pro-

nostican las tendencias futuras, las nuevas necesidades, se pueden analizar los impactos, así como también simular y optimizar diversas políticas que mejoren la calidad de vida y que permitan minimizar el deterioro ambiental y social a causa de una mala planeación o crecimiento descontrolado.

Los resultados de la modelación nos invitan a reflexionar y comprender el crecimiento de la vivienda de las ciudades en el estado de Nuevo León, lo cual contribuye a establecer estrategias de planeación que permitan mejorar la calidad de vida de los habitantes. Modelar la magnitud y localización de la expansión de la vivienda son conceptos claves para la planeación de las ciudades en el estado, brinda un enfoque para entender las necesidades futuras y cuantificar los costos diversos asociados a la urbanización, en particular los servicios públicos. El estado de Nuevo León, como otros estados del Noroeste del país, atraviesa temporadas de sequías prolongadas, lo que genera escasez de agua potable, derivándose en programas rigurosos de corte del suministro de agua a la población. El modelo también es útil para prever el aumento en la necesidad de agua potable en ciertas áreas determinadas, identificar esas áreas críticas, planificar la infraestructura hídrica, evaluar políticas de gestión del agua y promover la sostenibilidad en el estado.

Las modelaciones permiten visualizar y sugerir, con base en los resultados que arrojan los modelos, la proporción del incremento de todo tipo de viviendas, principalmente de interés social e interés medio, en los segmentos de construcción horizontal o vertical para cada uno de los 51 municipios del estado de Nuevo León, con mayor énfasis en los municipios del área Metropolitana. Otra aportación importante es que permite dimensionar el aspecto ambiental y de recursos hídricos principalmente, dadas las características de la zona regional del estado. La enorme presión de la rápida urbanización de la periferia del área Metropolitana se verá reflejada en los terrenos no urbanos, lo que provocará la disminución del uso de tierras agrícolas y lugares turísticos que rodean la capital del estado.

La velocidad de crecimiento de la zona urbana es preocupante, el modelo también permite brindar apoyo en la toma de decisiones para cuantificar la población y considerar las necesidades de carreteras, demanda de transporte, viabilidad hídrica, educación, salud, así como riesgos medioambientales, por mencionar algunos de los elementos que deben planearse minuciosamente por el gobierno y por los desarrolladores urbanos.

La apreciación en los resultados muestra que la expansión de los asentamientos no será aleatoria, sino que se concentrarán en ciertas zonas, lo que dificultará los diseños de los municipios por las limitantes de espacio.

Se recomienda el uso de los modelos de regresión lineal y polinómica en la predicción del crecimiento de la vivienda para aportar información que permita mejorar la toma de decisiones en el desarrollo de la infraestructura de las ciudades en el estado de Nuevo León.

Técnicamente el modelo permite ayudar a los profesionales a entender cómo funciona el fenómeno de crecimiento de la vivienda en el estado por cada municipio. Aunque el modelo de proyección del crecimiento urbano es capaz de evaluar el tamaño, el patrón y las tendencias de crecimiento urbano futuro con una precisión aceptable, queda corto al evaluar otros factores importantes que estimen un desarrollo urbano integral.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aczel, A. (2006). *Complete Business Statistics*. India: Mc Graw Hill.
- Aguilar, A. G. (1999). "Mexico City growth and regional dispersal: the expansion of largest cities and new spatial forms". In *Habitat International*, 391-412 [https://doi.org/10.1016/s0197-3975\(99\)00014-4](https://doi.org/10.1016/s0197-3975(99)00014-4).
- Alkheder, S. (2008). "Calibration and Assessment of Multitemporal Image-based Cellular Automata for Urban Growth Modeling". In *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1539-1550. <https://doi.org/10.14358/pers.74.12.1539>.
- Araya, Y. H. (2010). "Analysis and modeling of urban land cover change in Setúbal and Sesimbra, Portugal". In *Remote Sensing*, 2(6), 1549-1563. <https://doi.org/10.3390/rs2061549>.
- Bárceñas, A. (2020). "Tiene Nuevo León relevancia para la economía nacional". En *El Financiero* 06/01/2020. Recuperado de <https://www.elfinanciero.com.mx/monterrey/tiene-nuevo-leon-relevancia-para-la-economia-nacional/>
- CONAPO (2023). *Conciliación Demográfica de México 1950-2019*. Gobierno de México: Consejo Nacional de Población (CONAPO) .
- CONAPO (2024). *Reconstrucción y proyecciones de la población de los municipios de México 1990-2040*.
- Fang, S. G. (2004). "The impact of interactions in spatial simulation of the dynamics of urban sprawl". In *Landscape Urban Plan*, 294-306 <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2004.08.006>.
- INEGI (2020). *Panorama Sociodemográfico de Nuevo León. Censo de Población y Vivienda*. México: INEGI.
- Lewis, C. (1982). *Industrial and Business Forecasting Methods*. London: Butterworths.
- Makridakis, S. S. (1997). *Forecasting Methods and applications*. New York: Wiley.

- Mandelas, E. H. (2007). "A fuzzy cellular automata based shell for modeling urban growth—a pilot application in Mesogia area". In *Information Science*, 1-9.
- Montgomery, D. C. (2012). *Introduction to Linear Regression Analysis*, Fifth Edition. New Jersey: Wiley.
- Ostertagová, E. (2011). *Applied Statistics* (in Slovak), First Edition. Elfa: Košice.
- Poelmans, L. (2009). "Complexity and Performance of Urban Expansion Models". In *Computer Environment and Urban Systems*, 34(1), 17-27. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2009.06.001>.
- Rojas, N. I. (2020). "Modelación de crecimiento urbano". En *Bitácora* 32, 177-190, <https://doi.org/10.15446/bitacora.v32n1.87758>.
- Roy A, A. Z. (2022). "CurFi: An automated tool to find the best regression analysis model using curve fitting". In *Engineering Reports*, 4(12):e12522., DOI: 10.1002/eng2.12522.
- Sante, I. G. (2010). "Cellular Automata Models for the Simulation of Real-World Urban Processes: A Review and Analysis". In *Landscape and Urban Planning*, 108-122, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.03.001>.
- Seto, K. C. (2002). "Monitoring land-use change in the Pearl River Delta using Landsat TM". In *International Journal Of Remote Sensing*, 23(10), 1985-2004. <https://doi.org/10.1080/01431160110075532>.
- Sharma, V. K. (2020). "Modeling and Forecasting of Covid-19 Growth Curve in India". In *Transactions Of Indian National Academy Of Engineering*, 5(4), 697-710. <https://doi.org/10.1007/s41403-020-00165-z>.
- Stow, D. A. (2002). "Sensitivity of multitemporal NOAA AVHRR data of an urbanizing region to land-use/landcover changes and misregistration". In *Remote Sensing Of Environment*, 80(2), 297-307. [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(01\)00311-x](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(01)00311-x).
- Suárez, M. (2007). "La expansión urbana probable de la Ciudad de México. Un escenario pesimista y dos alternativas para el año 2020". In *Estudios Demográficos y Urbanos*, 22(1), 101-142., <https://doi.org/10.24201/edu.v22i1.1295>.
- Thapa, R. B. (2012). "Scenario based urban growth allocation in Kathmandu Valley, Nepal". In *Landscape Urban Planning*, 140-148., <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.12.007>.
- Wahyudi, A. (2013). "Cellular automata for urban growth modeling: a chronological review on factors in transition rules". In *Proceedings of CUPUM 2013: 13th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management-Planning Support Systems for Sustainable Urban Development*, 1-21. CUPUM.
- Xiao, J. S. (2005). "Evaluating urban expansion and land use change in Shijiazhuang, China, by using GIS and remote sensing". In *Landscape And Urban Planning*, 75(1-2), 69-80. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2004.12.005>

RESUMEN CURRICULAR DE LOS AUTORES*Refugio Chávez Hernández*

Es profesor asistente en el Departamento de Computación e Ingeniería Industrial en la Universidad de Monterrey, Nuevo León, México. Es Ingeniero Industrial y de Sistemas, tiene una maestría en Ingeniería Industrial y de Sistemas con énfasis en Logística. Actualmente cursa el Doctorado en Logística y Administración de la Cadena de Suministro en la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla. el maestro Chávez ha realizado proyectos de investigación y consultoría. Sus intereses de investigación incluyen productividad, simulación, optimización y manufactura esbelta. Es miembro del IISE y asesor del capítulo estudiantil del IISE de la Universidad de Monterrey.

Dirección electrónica: refugio.chavez@udem.edu

Registro ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5706-656X>

José Luis Martínez Flores

Es Doctor en Ingeniería con especialidad en Ingeniería de Sistemas. Actualmente es Profesor-Investigador de la Facultad de Ingeniería Industrial y Logística de la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla. Su área de interés está relacionada con la Optimización de Operaciones Logísticas en la Cadena de Suministro. Fue ganador del Premio Nacional de Logística en 2013. Ha sido consultor en diferentes empresas nacionales e internacionales del ramo logístico. Es investigador nacional, Nivel I, por el SNI-CONACyT a la fecha.

Dirección electrónica: joseluis.martinez01@upaep.mx

Registro ORC ID: <http://orcid.org/0000-0003-2986-469X>

Claudia Malcón Cervera

Es profesora de la Escuela de Negocios de UPAEP desde 2007. Obtuvo el grado de Licenciado en Sistemas Computacionales, de Maestro en Administración y de Doctor en Planeación Estratégica y Dirección de Tecnología por la UPAEP, en 1992, 2001 y 2008, respectivamente. Obtuvo el Diplomado en Minería de datos con aplicaciones para negocios por el Tecnológico de Monterrey en diciembre de 2013, una Certificación en Ciencia de datos aplicada con *Python* por la Columbia University, EUA en mayo de 2021, una Certificación en Consultoría general por CONOCER en agosto de 2021, y una Certificación en *Storytelling* y Persuasión con Datos por el INCAE de Costa Rica en septiembre 2022. Ha publicado ar-

tículos en revistas nacionales e internacionales arbitradas, en memorias de congresos internacionales arbitrados, además de participar en conferencias internacionales. En el 2013 desarrolló una aplicación para predecir deserción escolar en Instituciones de Educación Superior. En 2022 participó como coautor en el estudio “Situación de la Gestión de Datos y su vinculación con la Estrategia de Datos en América Latina”. Actualmente sus áreas de especialidad e investigación son en *Business Intelligence*, Minería de textos, Minería de datos: modelos descriptivos y predictivos, *Business analytics* y *Big data*.

Dirección electrónica: claudia.malcon@upaep.mx

Registro ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1352-8990>

Patricia Cano Olivos

Es profesora investigadora de la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, estudió Ingeniería Industrial, maestría en Ciencias en Ingeniería Industrial por el Instituto Tecnológico de Apizaco y doctorado en Logística y Dirección de la Cadena de Suministro por la UPAEP. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, sus líneas de investigación se enfocan en operaciones logísticas y análisis de riesgo y resiliencia de la cadena de suministro, ha sido ponente en diferentes congresos nacionales e internacionales, obteniendo dos veces el premio *Outstanding Research Award en Global Conference on Business and Finance*. Tiene publicaciones en revistas arbitradas e indexadas, así como la publicación del libro *Disaster Risk Recution In Mexico: Methodologies, Case Studies, And Prospective Views*.

Dirección electrónica: patricia.cano@upaep.mx

Registro ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1754-6619>

Artículo recibido el 02 de octubre de 2023 y aceptado el 15 de agosto de 2024

Publicado el 06 de octubre de 2025