



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
Área Académica de Matemáticas y Física

Análisis de la relación entre el
cambio climático y la migración de
la población en el Estado de
Hidalgo

T E S I S

que para obtener el título de:

Licenciada en Matemáticas Aplicadas

presenta

Yessica Rocio Rocha Villegas

Bajo la dirección de

Dra. Alma Sofía Santillán Hernández
Dr. Francisco Javier Martínez Farías

Mineral de la Reforma, Hidalgo.

Junio 2024



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
 Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
School of Engineering and Basic Sciences

Mineral de la Reforma, Hgo., a 24 de junio de 2024

Número de control: ICBI-D/874/2024

Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Con fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio le comunico que el Jurado asignado a la Egresada de la Licenciatura en Matemáticas Aplicadas **Yessica Rocío Rocha Villegas**, quien presenta el trabajo de titulación "**Análisis de la relación entre el cambio climático y la migración de la población en el Estado de Hidalgo**", después de revisar el trabajo en reunión de Sinodales ha decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

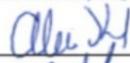
A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Dr. Federico Menéndez Conde Lara

Secretario: Dr. Francisco Javier Martínez Farías

Vocal: Dra. Alma Sofía Santillán Hernández

Suplente: Dra. Erika Elizabeth Rodríguez Torres


 Francisco Javier Martínez Farías

 Alma Sofía Santillán Hernández

 Erika Elizabeth Rodríguez Torres

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
 "Amor, Orden y Progreso"

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
 Director del ICBI



GVR/YCC

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
 Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001
 direccion_icbi@uaeh.edu.mx,
 acevedo@uaeh.edu.mx



uaeh.edu.mx

Agradecimientos

Este trabajo es la prueba del término de una etapa en mi vida, una de las más importantes y que deja en mí miles de aprendizajes y recuerdos; por ello quiero comenzar con quienes me ayudaron a desarrollar todas estas ideas y dejar una huellita de mi en este enorme mundo de grandes investigaciones. Gracias doctora Alma, doctor Francisco, por todo su esfuerzo en ayudarme a culminar este trabajo, por compartir sus conocimientos conmigo, por su paciencia, su amabilidad, por no soltarme ni rendirse conmigo a pesar de mis errores, apoyarme cuando mis ideas estaban confusas, escucharme y por sus palabras de aliento que me hicieron crecer y sentirme segura de mi y mis conocimientos. El trabajar con ambos fue una de las mejores experiencias en mi transcurso por la LiMA porque yo estaba completamente pérdida sobre qué hacer y ustedes me brindaron una luz que el día de hoy ilumina el comienzo de un nuevo camino, por eso les estoy y estaré siempre agradecida.

También quiero agradecer a todos los doctores del área, aquellos que me dieron clases y con los que tuve la oportunidad de convivir, por los que se preocupan por el aprendizaje de los estudiantes y nos recuerdan que ser un genio no es lo más importante, sino el trabajar duro, ser paciente, persistente y sobre todo que el conocimiento es para compartirse, ser solidario y progresar juntos. A todos ustedes muchas gracias por compartir su pasión por aquello que aman hacer y sobre todo por compartir sus valores y consejos, es algo que llevaré siempre conmigo.

Mientras avanzaba en la carrera hubo muchos momentos difíciles, me enfrenté a muchos retos y cambios en cada una de estas aulas y pasillos, y sin duda alguna puedo decir que una parte importante de que yo esté aquí el día de hoy es gracias a mis amigos: Rubén, Verania, Diego, Rosa, Karen, Saúl, Abi, Alonso y Pepe. Con los que tengo miles de memorias, con quienes reí, bailé, canté, lloré, jugué, pero, sobre todo, aprendí. Gracias amigos, por ser pacientes conmigo, por motivarme y nunca dejarme atrás, por ayudarme a ser una mejor persona, por mostrarme lo que es la verdadera amistad y por todo su amor. Quiero que sepan que sin importar a donde nos lleve la vida o cuánto tiempo nos tome reunirnos de nuevo, los llevaré en mi

corazón y atesoraré estos recuerdos por siempre.

Finalmente, quiero agradecer a las personas más importantes de mi vida, mi familia. Mamá, papá, hermana, ¡lo logramos! Gracias por todo su apoyo constante e incondicional cuando los días eran difíciles y cuando dimos pequeños pasos en este camino. Gracias por su paciencia, por escucharme siempre, por la confianza, por cuidar siempre de mi y sobre todo por su amor, que sin duda me da la fuerza para superar cualquier obstáculo y hoy nos da un logro más. Los amo.

Resumen

En los últimos 40 años, la temperatura en México se ha incrementado entre 0.7 y 1°C provocando una disminución en la cantidad de lluvia. El cambio climático ha sido relevante en los movimientos migratorios. En el año 2018, el 19% de los nuevos desplazamientos internos a nivel mundial fueron como consecuencia de inundaciones y 33% a causa de tormentas. Este trabajo propone una medida del cambio climático para las localidades del Estado de Hidalgo para los años 2000 y 2020. Esta medida incorpora, además de las variaciones en el clima y lluvia, indicadores del nivel de resiliencia de la población ante los efectos de las variaciones climáticas. La medida o a la que llamaremos también índice permite identificar a las localidades que son más vulnerables a las variaciones del clima y lluvia. Esto podría permitir a los tomadores de decisiones adoptar medidas preventivas que apoyen en la reducción de las consecuencias negativas del cambio climático. Con base en este índice, la población que permanece en el estado, los migrantes de retorno de Estados Unidos y los migrantes circulares entre Hidalgo y Estados Unidos (como medidas de migración poblacional), se analiza la relación entre el cambio climático y la migración por medio de modelos fraccionarios, que con el fin de evitar la presencia de heterocedasticidad y en conjunto con las características de los datos de migración, utiliza el método de cuasi-verisimilitud. Los resultados indican, en los últimos 20 años, las localidades del estado son cada vez más propensas a incrementar su vulnerabilidad en términos climáticos; aquellas que han aumentado en mayor medida su vulnerabilidad se encuentran en el municipio de Metztitlán. Los datos muestran evidencia a favor de una relación positiva entre la migración y el cambio climático; la asociación es más grande en aquellas localidades que tienen mayores niveles de vulnerabilidad climática.

Abstract

In the last 40 years, the temperature in Mexico has increased between 0.7 and 1°C caused of rain decrease amount. Climate change has been relevant in the migratory phenomena. In 2018, 19 % of globally new internal displacements were due to floods and 33 % due to storms. This work seeks to estimate a climate change measure for the state of Hidalgo localities for the years 2000 and 2020. That measure incorporates variations in climate and rainfall, indicators of the level of resilience of the population to the effects of climatic variations. This work allows decision-makers to adopt preventive measures that may aid in the reduction of the negative consequences of climate change. The vulnerability index proposed makes it possible to identify the weakest localities to climate and rainfall variations. Based on this index, the population that remains in the state, return migrants from the United States, and circular migrants between Hidalgo and the United States (as measures of population migration), the relationship between climate change and migration is analyzed through fractional models, which in order to avoid the presence of heteroscedasticity and together with the characteristics of the migration data, use the quasi-likelihood method. The results indicate that in the last 20 years, the state's localities have been increasingly prone to increase their vulnerability in climatic terms; those that have reached a higher degree of vulnerability are found in the Municipality of Metztlán. The data show evidence of a positive relationship between migration and climate change; the association is more significant in those localities with higher levels of climatic vulnerability.

Índice general

Introducción	11
1. Registros históricos climáticos del estado de Hidalgo	15
1.1. Preliminares	15
1.1.1. Interpolación por vecinos naturales	16
1.2. Datos climáticos	18
1.3. Interpolación de datos climáticos del estado	19
2. Índice de Vulnerabilidad Climática	23
2.1. Antecedente	23
2.2. El índice de vulnerabilidad climática en el Estado de Hidalgo	24
2.2.1. El subíndice social	27
2.2.2. El subíndice climático.	30
2.3. Resultados del método de clasificación del IVC	36
2.4. Método de clasificación por k-medias.	42
3. Fenómeno migratorio humano en el estado de Hidalgo.	45
3.1. Preliminares	46
3.2. Medidas de la migración	49
3.3. Estimación de la relación entre IVC y migración	51
3.3.1. Permanencia	51
3.3.2. Migrantes circulares	53
3.3.3. Migrantes de retorno	56
Conclusiones	63
Bibliografía	67
Apéndice A	73

Apéndice B

81

Introducción

La migración es uno de los fenómenos poblacionales más importantes del desarrollo de la sociedad y de su creación misma. Por la cercana interacción con distintos procesos demográficos a nivel mundial genera un gran impacto en los ámbitos económicos, políticos y tecnológicos, pero no solo eso; ya que es un movimiento que tiene distintas dimensiones tanto de tiempo como distancias, al enfocarnos en regiones en particular, podemos observar que la migración es determinante de grandes aspectos de nuestra vida diaria, como en el ámbito laboral, la cultura y la dinámica de la sociedad. Por ejemplo, la mayoría de las migraciones con motivos socio económicos son en busca de mejores niveles de vida y oportunidades laborales, así, estos movimientos se caracterizan por realizarse entre regiones con grandes contrastes debido a las diferencias marcadas en sus niveles de urbanización, empleo, educación, salud, etc. Mientras que los desplazamientos provocados por motivos políticos originados por enfrentamientos, guerras, desigualdad y persecuciones, entre otros; generan una gran preocupación tanto en las regiones de salida como en las de destino, al tener que integrar a esa población a la estructura social y proveerlos de los servicios básicos que en el lugar de origen eran limitados o simplemente no están disponibles.

Considerando lo anterior, es posible identificar basándose en el contexto en el que se llevan a cabo estos desplazamientos, ya sean forzados o no, de manera temporal o permanente, la conceptualización de la migración con múltiples enfoques e interpretaciones, por eso no existe un concepto universal que defina la migración, sin embargo, eso no significa que no haya generalizaciones aceptables, como las que nos proporcionan algunos diccionarios como la Real Academia Española que define la migración como el “desplazamiento geográfico de individuos o grupos, generalmente por causas económicas o sociales” (RAE *s.f.* definición 2). A su vez distintos organismos encargados de reunir datos y construir informes sobre este fenómeno también presentan definiciones, tal es el caso de la Organización Internacional para las Migraciones (IOM, por sus siglas en inglés), que identifica a la migración como el movimiento de las personas de un área o una ciudad a otra con el propósito de establecer una nueva residencia de forma temporal o permanente (IOM, 2013).

De este modo al hablar de migración es más intuitivo abordar la situación al considerar cifras que expresen de mejor manera los detalles de estos movimientos. De acuerdo con la IOM (2019) en junio del 2019 se contaba con un aproximado de 272 millones de migrantes internacionales, de los cuales un tercio son migrantes laborales. Además en los años 2018 y 2019 se presentaron grandes movimientos originados por conflictos, violencia extrema, inestabilidad económica y política en distintos países como la salida de miles de personas de Venezuela.

Por otro lado, en México el contexto histórico nos muestra que la migración hacia Estados Unidos es de los principales desplazamientos internacionales de la población mexicana, motivados por factores económicos como el salario y desempleo en el país, y el Producto Interno Bruto de Estados Unidos (Figuroa Hernández et al. 2015). Y aunque los desplazamientos al interior de la república también son en su mayoría por motivos económicos, en la actualidad es un hecho que distintos factores como la violencia han generado un impacto en los movimientos forzados; tan solo en el año 2020 el 4.1 % (262,411 personas) del total de migración interna del país entre distintos estados es resultado de la violencia e inseguridad (Romo et al. 2021).

Aunque, de manera general la mayoría de los movimientos migratorios se caracterizan por tener motivos económicos como el nivel de pobreza o desempleo; también resaltan otros factores como las razones políticas como guerras, desigualdad y persecución; o sociales como educación, matrimonio, cultura, etc. (Telsaç y Yürsek, 2022). En México la violencia es un claro ejemplo que se va manifestando con mayor frecuencia en los motivos de las movilizaciones, y no es el único pues existen otros fenómenos que comienzan a tener repercusiones importantes como lo son, los efectos generados por el cambio climático.

El desarrollo de la sociedad ha traído consigo una innumerable cantidad de cambios en el medio que nos rodea, es así que con el paso del tiempo y el crecimiento poblacional, los ecosistemas se han desgastado, por lo que cada vez es de mayor relevancia el buscar técnicas de adaptación para garantizar la supervivencia en ellos, con esto surge el fenómeno del cambio climático. Este concepto tiene una multiplicidad de enfoques de análisis por lo que distintos organismos han planteado sus propias definiciones, por ejemplo, las Naciones Unidas define el cambio climático como “los cambios a largo plazo de las temperaturas y los patrones climáticos” (UN, s.f.).

Durante las últimas décadas, el cambio climático ha presentado una gran relevancia en los movimientos migratorios; En el año 2018, en 148 países, de un total de 28 millones de nuevos desplazamientos internos, 5.4 millones de personas se movilizaron como consecuencia de inundaciones y 9.3 millones a causa de tormentas (IOM, 2019). Sin embargo, estas causas solo nos aportan un enfoque de desplazamientos por desastres originados por eventos climáticos extremos; el delimitar la migración

originada por todas las consecuencias del cambio climático trae consigo un sin número de enfoques, definiciones y consideraciones que motiva a la creación de nuevos conceptos como los migrantes o refugiados ambientales, sobre los cuales existen una gran discusión. Stavropoulou (2008), expone que algunas personas opinan que lo adecuado es considerarlos ‘refugiados medioambientales’, ya que esto proporciona un sentido de urgencia ante los desastres y evoca una responsabilidad y cooperación internacional. Por otro lado, muchos otros argumentan que al denominarlos refugiados se puede perder la noción original de refugiado, por lo que consideran que es mejor generar nuevos instrumentos que adopte todas sus consideraciones, ya que las movilizaciones de este tipo pueden ser tanto forzadas como voluntarias.

Así múltiples organizaciones y expertos han abordado la tarea de analizar las movilizaciones en el contexto del cambio climático estableciendo sus propias definiciones y restricciones. En México este tema también muestra avances, por ejemplo, el Consejo Nacional de Población (CONAPO) muestra una descripción acerca de las movilizaciones relacionadas con desastres naturales a medida de evaluación de los efectos climáticos. Romo et al. (2021), utilizando información del Centro de Monitoreo sobre Desplazamiento Interno (IDMC, por sus siglas en inglés) muestran que en México la mayoría de estos desplazamientos son debido a tormentas, inundaciones y desplazamientos de tierra húmeda generando más del 97.3% de traslados totales generados por desastres.

En la búsqueda de una medida que cuantifique el cambio climático de una región, se cuenta con el índice de vulnerabilidad climática (IVC) construido por el Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO, 2012). Abordar el impacto del cambio climático tiene muchas perspectivas que pueden no incluir aspectos relevantes sobre la adaptación o capacidad de respuesta de la población. El proyecto de IMCO desarrolla una medida de la probabilidad de pérdida ante riesgos derivados del cambio climático considerando que el impacto que genera no solo se refleja en los estragos que pueda provocar un fenómeno meteorológico extremo, ya que existen otras variaciones climáticas como el aumento regular de temperatura, que provoca sequías y que no son perceptibles de manera inmediata, es por ello que se analizan la mayor cantidad de factores posibles, como lo son la capacidad que presenta una sociedad para adaptarse a tales cambios y los recursos con los que se cuenta para lograrlo de forma satisfactoria.

El objetivo de este trabajo es estimar el índice de vulnerabilidad climática siguiendo el método del IMCO para las localidades del Estado de Hidalgo durante los años 2000 y 2020; esta medida incorpora, además de las variaciones en el clima y lluvia, indicadores del nivel de resiliencia de la población ante los efectos de las variaciones climáticas. El índice estimado permite identificar a las localidades que son más vulnerables a las variaciones de la temperatura y la lluvia. Con base en este índice

y en tres medidas de migración poblacional, se analiza la relación entre el cambio climático y la migración por medio de modelos fraccionarios.

La tesis se encuentra estructurada de la siguiente manera: en el primer capítulo se abordan los registros históricos climáticos del estado de Hidalgo, de manera específica la lluvia y temperatura. Debido a la falta de información y periodicidad del registro se realiza un método de estimación de los datos faltantes. En el segundo capítulo se describe la manera en la que se construye el índice de vulnerabilidad climática para distintos años con el fin de lograr una comparación a través del tiempo. Posteriormente en el tercer capítulo se presenta un análisis de la relación entre el IVC y tres medidas de migración de México hacia Estados Unidos: porcentaje de población que permanece en su localidad de nacimiento, el porcentaje de viviendas con migrantes circulares y con migrantes de retorno. Un mejor panorama se tendría al considerar también medidas de migración interna y hacia otros países, sin embargo, se utilizan estas variables debido a la falta de medidas migratorias para todos los periodos de construcción del índice de vulnerabilidad climática. Finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo.

Capítulo 1

Registros históricos climáticos del estado de Hidalgo

Para estimar el índice de vulnerabilidad climática (IVC) es necesario contar con información de temperatura y lluvia para cada localidad del estado de Hidalgo. Sin embargo, los datos climáticos se registran por medio de estaciones meteorológicas, las cuales no están presentes en todas las localidades del estado, ni han estado activas en todo momento del tiempo. El presente capítulo contiene detalles acerca de la información climática disponible en el estado de Hidalgo y con el propósito de completar los datos faltantes, se expone la teoría básica del método de interpolación utilizado para obtener las estimaciones necesarias, así como algunos gráficos que ilustran los resultados de la misma.

1.1. Preliminares

La construcción del IVC comprende el uso de distintas variables tanto climáticas como sociales. Comenzando con el análisis de la información disponible, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, s.f.) cuenta con la medición de variables climáticas como la lluvia y temperatura en un periodo de tiempo definido para la región de interés, que en este caso es el estado de Hidalgo. Sin embargo, esta información está disponible para cada una de las estaciones meteorológicas distribuidas por todo el estado. Por lo anterior, al no contar con una estación en cada localidad la primer interrogante a resolver es: con la información disponible ¿se puede estimar el valor de cada variable climática para cada una de las localidades del estado?

En busca de esta respuesta, al considerar un escenario básico con datos climáticos fijos, por ejemplo, la cantidad de lluvia para todas las estaciones del estado en

un año en particular y considerando las coordenadas geográficas de cada estación (CONAGUA) y localidad del estado ¹, el objetivo es poder asignar un valor de la cantidad de lluvia para la localidad X en base a la(s) estación(es) mas cercanas.

Para esto al considerar una estación fija E_0 se delimita un área alrededor con todos los puntos cuyas distancias a E_0 sean menores o iguales que las distancias de dichos puntos al resto de las estaciones, es decir, al considerar un punto arbitrario y , este formará parte de la zona de E_0 si $d(y, E_0) \leq d(y, E_j)$ con $j \neq 0$, con lo anterior se delimita una zona para cada estación. Estas zonas pueden considerarse como una división del espacio donde cada una comprende una estación. Luego, al agregar la ubicación geográfica de una localidad arbitraria, digamos z , como un nuevo punto en el plano, se puede construir una nueva zona a su alrededor conformado por pedazos de las zonas de cada una de las estaciones vecinas a z . Con lo anterior, el valor de la lluvia en la localidad z puede estimarse como una proporción de los valores de lluvia de las estaciones vecinas en base al área de las zonas que cada estación cede a la construcción de la zona de la localidad.

El escenario anterior describe de forma particular un método de interpolación de datos dispersos enfocado al análisis que se requiere, donde dada una colección discreta de datos conocidos se busca construir una función que se aproxime a dichos datos, es decir, dada una colección de datos dispersos $X = \{x_i\}_{i=1, \dots, n}$ y $Z = \{z_j\}_{j=1, \dots, n}$, donde para cada $x_i \in \mathbb{R}^2$ se conoce un $z_j \in \mathbb{R}$. La interpolación de datos dispersos consiste en construir una función $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ tal que $f(x_i) = z_i$, para así poder evaluar f en distintos puntos de consulta.

Actualmente existen múltiples métodos de interpolación basados en distintos objetos, como la interpolación triangular cúbica, las funciones de base radial, el método de splines-3 o interpolación por vecinos naturales, entre otras; que garantizan diferentes características en la función como continuidad y/o diferenciabilidad; utilizar uno u otro método depende de la distribución de los datos muestrales, el orden del error que se desea manejar y el costo computacional.

1.1.1. Interpolación por vecinos naturales

El método de interpolación por vecinos naturales es el tipo de interpolación que se sigue utilizar para el caso de datos climáticos (Amidror, 2002), es así que la siguiente descripción y notación utilizada está basada en lo presentado por Amidror

¹Las coordenadas geográficas utilizadas son obtenidas de INEGI y se pueden consultar en la siguiente liga: <https://www.inegi.org.mx/app/ageeml/>

(2002), más detalles sobre el método también pueden consultarse en ese artículo. De manera general, este es un método de interpolación local que dado un conjunto discreto de puntos construye lo siguiente:

Teselación de Voronoi

Sea $X = \{x_i\}_{i=1,\dots,n}$ un conjunto de datos tal que $x_i \in \mathbb{R}^2$. Una teselación de Voronoi es un conjunto $\mathcal{V}(X) = \{\mathcal{T}_i\}_{i=1,\dots,n}$, tal que

$$\mathcal{T}_i = \{x \in \mathbb{R}^2 \mid d(x, x_i) \leq d(x, x_j), i \neq j\},$$

donde $d(\cdot, \cdot)$ es la distancia Euclidiana en \mathbb{R}^2 . (T. Bobach y Umlauf, 2006).

En una teselación de Voronoi se conoce como sitio a cada x_i y como región de Voronoi a cada \mathcal{T}_i donde cada región es un polígono convexo y forman una partición del plano (Aurenhammer, 1991). Un ejemplo de este diagrama puede observarse en el panel A de la figura 1.1. Una vez contando con esta división del espacio es posible identificar, dado un sitio fijo, cuales son los polígonos que colindan con su región de Voronoi, lo que nos lleva a la siguiente definición.

Vecinos naturales

Sea $X = \{x_i\}_{i=1,\dots,n}$ un conjunto de sitios, al considerar x_i y x_j con $i \neq j$ se dice que son **vecinos naturales** si sus regiones de Voronoi son tales que

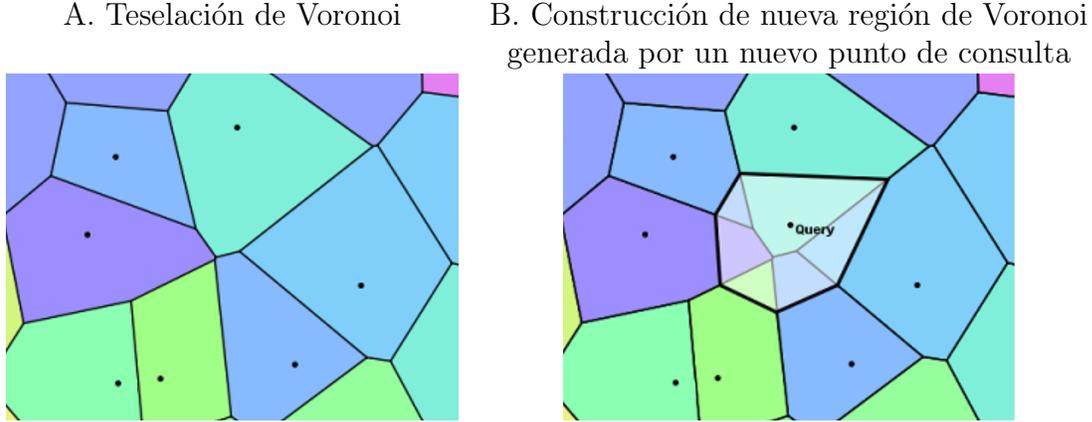
$$\mathcal{T}_i \cap \mathcal{T}_j \neq \emptyset.$$

Además se define N_j como el conjunto de índices de todos los x_i que son vecinos naturales de x_j . Por otro lado, se puede decir que un par de sitios son vecinos naturales si sus respectivas regiones de voronoi comparten un punto o arista. (T. A. Bobach, 2008).

Con lo anterior, al contar con un conjunto de sitios $X = \{x_i\}_{1,\dots,n}$, donde para cada $x_i \in \mathbb{R}^2$ se conoce un $z_i \in \mathbb{R}$ y construir una teselación de Voronoi $\mathcal{V}(X)$, entonces al considerar un punto arbitrario $x_0 \in \mathbb{R}^2$ se puede construir una nueva teselación de Voronoi $\mathcal{V}(X')$ con el conjunto de sitios $X' = X \cup \{x_0\}$ y un polígono $\mathcal{T}_0 = \{y \in \mathbb{R}^2 \mid d(y, x_0) \leq d(y, x_i), i \neq 0\}$, notando así que \mathcal{T}_0 se encuentra compuesto por fragmentos de los polígonos correspondientes a los vecinos naturales x_i de x_0 con $i \in N_0$ como puede observarse en el panel B de la figura 1.1. Estos fragmentos son denotados como $\mathcal{T}_i(x_0) = \mathcal{T}_0 \cap \mathcal{T}_i$.

Finalmente denotando el área de cada \mathcal{T}_i como $\text{área}[\mathcal{T}_i]$ entonces el valor de $z_0 \in \mathbb{R}$,

Figura 1.1: Ejemplo de una teselación de Voronoi y de la construcción de una nueva región de Voronoi considerando un punto de consulta



Nota: imagenes tomadas de *An introduction to natural neighbor interpolation*, por Lucas (s.f.), <https://gwlucastrig.github.io/TinfourDocs/NaturalNeighborIntro/index.html>

conocido como el valor del **interpolante natural** para x_0 , puede definirse como:

$$z_0 = \hat{f}(x_0) = \sum_{i \in N_0} h_i(x_0) * z_i, \quad (1.1)$$

donde $h_i(x_0) = \frac{\text{área}[T_i(x_0)]}{\text{área}[T_0]}$ por lo que $0 \leq h_i(x_0) \leq 1$ y $\sum_{i \in N_0} h_i(x_0) = 1$.

De lo anterior es importante observar que la función h_i tiene un comportamiento suave, ya que si x_0 se aleja del punto x_i , entonces h_i va decreciendo hasta ser cero, es decir, cuando no sean vecinos naturales. Por otro lado, h_i toma el valor de 1 cuando x_0 es el mismo x_i . Así, se tiene que el interpolante resultante es una función de clase \mathcal{C}^0 . Sin embargo, este método de interpolación puede extenderse para construir una función que sea de clase \mathcal{C}^1 y múltiples alternativas para construir \hat{f} con esta característica pueden consultarse en T. A. Bobach (2008).

1.2. Datos climáticos

Como se presentó previamente, la construcción del IVC requiere de los datos de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y cantidad de lluvia (mm) para cada localidad del estado de Hidalgo. La CONAGUA proporciona vía su portal en línea, los registros históricos de cada una de las estaciones meteorológicas del estado, disponiendo así, del registro

mensual de los datos climáticos de 151 estaciones, sobre distintas características climáticas como lo es la cantidad de días con granizo, niebla, tormentas, lluvia total y temperatura media de forma mensual para cada año activo de la estación.² Esta información se encuentra disponible principalmente del año 1960 al 2019; aunque uno de los problemas es que algunas estaciones detuvieron sus actividades en algún punto del tiempo como puede observarse en la tabla del apéndice A.1 que muestra el listado completo de todas las estaciones del estado de Hidalgo, sus coordenadas de latitud y longitud, así como su estado de operación. Además, la figura 1.2 muestra que no todas las localidades ni municipios cuentan con una estación que registre sus datos climáticos, por lo que resulta natural buscar un método para asociar a cada localidad, la información climática de la estación más cercana y estimar los datos climáticos faltantes debido a la suspensión de actividades de una estación meteorológica.

1.3. Interpolación de datos climáticos del estado

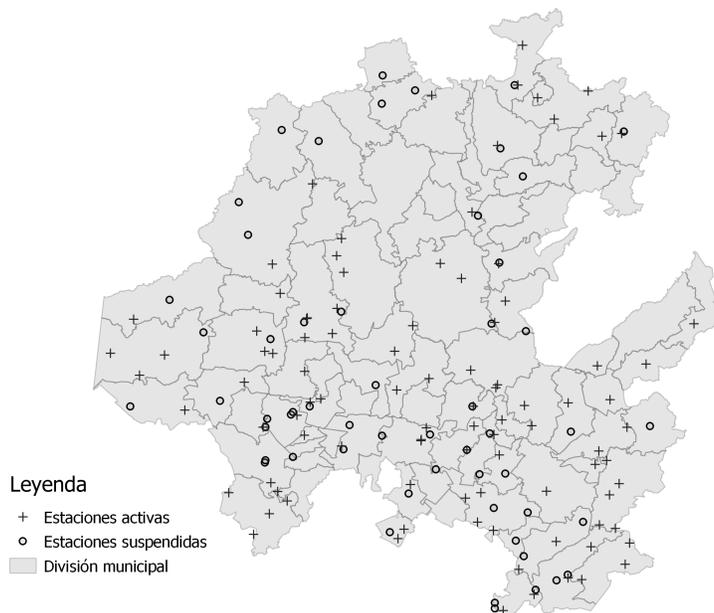
Como resultado de las secciones anteriores el primer objetivo es poder atribuir una cantidad de lluvia o temperatura mensual a cada una de las localidades para cada año desde 1960 hasta el 2019, sin embargo, hay estaciones meteorológicas cuyo periodo de funcionamiento es muy corto, como la estación 13063-*Tizayuca SMN* que estuvo activa desde 1963 hasta 1977; o también está el caso en el que hay localidades que no cuentan con una estación que registre sus datos climáticos como lo son todas aquellas que pertenecen al municipio de Atotonilco de Tula.

Para poder obtener valores estimados de cada localidad por cada mes y año se emplea el método de interpolación de vecinos naturales que se discutió en secciones previas. Para ello, consideremos un año y mes fijos, por ejemplo, el mes de enero del año 2000. Sea $X = \{x_i\}$ el conjunto de sitios generadores de una teselación de Voronoi y que corresponde a las coordenadas geográficas de todas las estaciones meteorológicas del estado que cuentan con registros del mes de enero del año 2000; es decir, cada x_i es una pareja ordenada formada por la latitud y longitud de la estación i ; y sea $x_0 \in \mathbb{R}^2$ las coordenadas geográficas de una localidad arbitraria. Luego z_i corresponde al valor, supongamos de temperatura, para la localidad i . Por lo que, mediante el método de interpolación es posible estimar el valor de temperatura para la localidad x_0 en el mes de enero del año 2000, es decir, obtener $\hat{f}(x_0)$ como se indica en la ecuación 1.1.

Finalmente, este proceso debe realizarse para cada mes $j = 1, \dots, 12$, año

²Los datos se pueden consultar en la siguiente liga <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>

Figura 1.2: Ubicación de las estaciones meteorológicas del estado de Hidalgo.

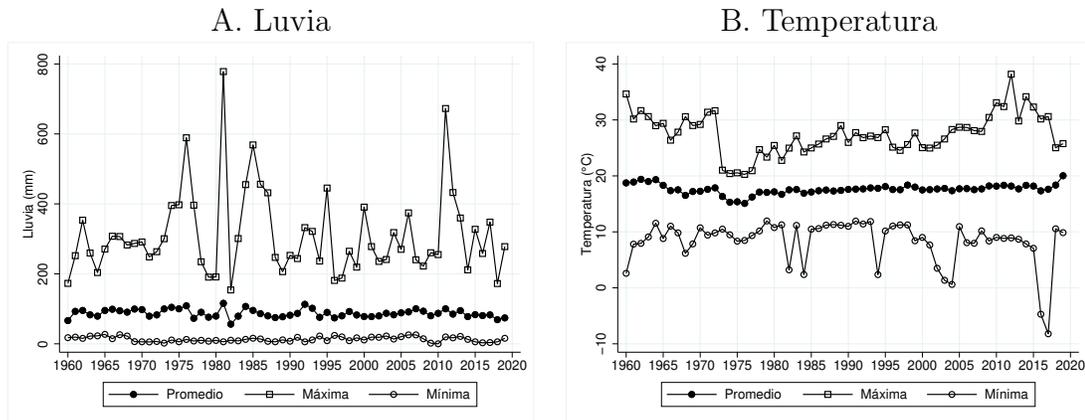


Fuentes: elaboración con datos de CONAGUA empleando el programa QGis 3.22.10. La base de división municipal corresponde a CONABIO (2018).

$k = 1960, \dots, 2019$ y localidad $l = 1, \dots, 3421$ utilizando el correspondiente conjunto de sitios generadores $X_{j,k}$ que corresponde a las estaciones que cuentan con registros climáticos para el mes j y año k y sus valores de lluvia o temperatura $z_{j,k}$. En el apéndice A se muestra el código A.1 desarrollado en Matlab donde se implementa este método de interpolación sobre los datos que se tienen mediante el uso de la función *scatteredInteporlant()*.

Una vez obtenidos los datos climáticos para todas las localidades del estado de Hidalgo, se pueden generar figuras como las que se presenta la Figura 1.3, la cual nos muestra los valores estimados promedio, máximo y mínimo anuales de la temperatura y la lluvia. Puede observarse que los valores máximos de lluvia presentan más variaciones, mientras que los valores mínimos se mantienen alrededor de los

Figura 1.3: Estimación de la lluvia y temperatura promedio anual por medio del método de interpolación de vecinos naturales



Nota: elaboración con resultados de la interpolación de datos. Para cada localidad se calcula el promedio anual usando los datos climáticos mensuales; los valores que se presentan en las gráficas muestran el promedio, el máximo y el mínimo anuales de todas las localidades.

13mm. Además, es evidente que la cantidad de lluvia máxima en los últimos 5 años ha presentado de forma general una disminución. Más aún, el panel B de esta figura nos muestra que la temperatura mínima ha tenido descensos considerables para el año 2016 y 2017, por otro lado, las temperaturas máximas en la última década presentan valores altos en comparación con otros años, mostrando así, que el clima en el estado cada vez alcanza valores más extremos con altos o muy bajos niveles de temperatura y, aunado a la disminución en la cantidad de lluvia, esto puede verse reflejado en sequías a lo largo de todo el estado.

Capítulo 2

Índice de Vulnerabilidad Climática

Con la finalidad de realizar una construcción propia y comparable en el tiempo de la vulnerabilidad climática para cada localidad del estado, el presente capítulo describe el algoritmo para construir el IVC, el cual fue propuesto por el IMCO en el año 2010 y se aplicó a algunos municipios de México. Posteriormente en este mismo capítulo, tomando en cuenta la disponibilidad y periodicidad de los datos, se describe el proceso de estimación de los IVC para las localidades del estado de Hidalgo para los años 2000, 2010 y 2020. Sobre el proceso de construcción se presentan subsecciones correspondientes a los subíndices que se pueden construir, las variables que se utilizan y el tratamiento que se les da a todos los datos disponibles para cada año. Luego se realiza un método de agrupación por k-medias para formar categorías de vulnerabilidad climática para cada año. Finalmente se tiene una sección de resultados donde se muestran gráficas y tablas con información de los nuevos IVC y estadísticas que describen la evolución de la vulnerabilidad climática en el estado.

2.1. Antecedente

Como se mencionó al principio de este trabajo, en la búsqueda de una medida que refleje el cambio climático se emplean múltiples recursos bajo distintos enfoques. Los resultados expuestos sobre el índice de vulnerabilidad climática (IVC) construido por el Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO, 2012), muestran que esta medida no solo considera los efectos sobre los datos climáticos, consecuencia de cambios o eventos meteorológicos extremos, sino que aborda un enfoque de análisis donde evalúa variaciones regulares del clima para observar, en cambios a largo plazo, la capacidad de la sociedad para enfrentar estos eventos, adaptarse y los recursos con los que cuenta. En este sentido el índice se conforma de tres grandes subíndices: el

climático, el infraestructural y el social.

El subíndice climático que conforma el IVC refleja la vulnerabilidad de un sistema físico al daño de un evento climático extremo, sin embargo, este no considera el impacto que puede generar sobre los individuos. Los subíndices sociales y de infraestructura reflejan el grado al que una sociedad es susceptible a sufrir un daño, y que está determinada por las características de la población y localidad; como lo son la pobreza, la infraestructura, las tasas de crecimiento poblacional, etc. Por ejemplo, una localidad con mayor tasa de niños o adultos mayores y con menos rutas de evacuación o poco acceso a medios de comunicación son más vulnerables.

Con base en este índice en IMCO (2012) se obtiene una clasificación de vulnerabilidad para los principales municipios del país, mostrando que estos se agrupan alrededor de la vulnerabilidad media. El estado con mayor cantidad de municipios en la categoría de vulnerabilidad muy alta es Veracruz y el que tiene mas municipios con vulnerabilidad muy baja es Nuevo León. Por otro lado, de los 16 municipios de Hidalgo que se emplearon en la muestra de estudio, encuentran que 6 tienen vulnerabilidad baja, 3 con vulnerabilidad media baja, 1 con vulnerabilidad media, 5 con vulnerabilidad media alta y solo 1 con vulnerabilidad alta. Por último, también se encuentra que los municipios con pocos habitantes pueden designarse como más vulnerables ya que los índices sociales y de infraestructura son mas elevados como consecuencia de su lejanía de los municipios más urbanizados.

2.2. El índice de vulnerabilidad climática en el Estado de Hidalgo

Se retoma la construcción del índice de vulnerabilidad climática, propuesto en IMCO (2012), como medida del impacto del cambio climático, pero esta vez, con el propósito de observar de manera más detallada tales efectos, se realiza con una desagregación por localidad. Por otro lado, debe mencionarse que la construcción del índice en el artículo del equipo de IMCO (2012) no permite hacer predicciones sobre el comportamiento de los municipios ante el impacto de fenómenos climáticos; pues los datos utilizados corresponden a diferentes años. Así, para poder realizar una comparación en el tiempo del índice de vulnerabilidad, en este trabajo, se reconstruye el IVC con los datos específicos de los años 2000, 2010 y 2020, obteniendo así tres índices de vulnerabilidad climática para las localidades del Estado de Hidalgo, basados en la periodicidad de la información proporcionada por el Censo de Población y Vivienda realizado por el Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía (INEGI). Además debe mencionarse que haciendo uso de bases de datos públicas hay indicadores

que no fue posible obtener ya que aún no se cuenta con un registro de estos a nivel localidad o no se encuentran para los años especificados. Por lo tanto, la estructura de los IVC consta solo de dos subíndices: el subíndice social y el climático, en la figura 2.1 se muestra de forma general su composición y construcción, mientras que la tabla 2.1 presenta detalles de la disposición de cada una de las variables, así como su fuente. En las siguientes subsecciones correspondientes a cada subíndice se explica con más detalle el tratamiento de cada variable.

2.2.1. El subíndice social

El subíndice social comprende las características de la población que determinan su capacidad para enfrentarse a las amenazas climáticas.

Variables que conforman al subíndice social

A continuación se presenta una lista de las variables que se incorporan en este subíndice y se explica la relación de cada una con la vulnerabilidad climática.

- Población de 0 a 4 años.¹ Esta variable proviene de INEGI (2001), INEGI (2011) y INEGI (2021): El impacto de esta variable es directo sobre el IVC, ya que a esta edad un desastre climático extremo aumenta el riesgo de contraer enfermedades, generar traumas o quedar expuestos al ser separados de sus familias (UNICEF, 2022).
- Población con limitación para caminar o moverse. Esta información se obtuvo de INEGI (2001), INEGI (2011) y INEGI (2021): Esta variable también afecta de forma directa en el índice de vulnerabilidad climática pues no es tarea fácil movilizar a esta población, además de que su recuperación es más lenta en caso de afectaciones por un evento climático (IMCO, 2012).
- Personas de 65 años y más. Los datos se obtuvieron del INEGI (2001), INEGI (2011) y INEGI (2021): Los adultos mayores también representan un grupo de alta vulnerabilidad pues al exponerse a un fenómeno climático extremo pueden presentar restricciones de movilidad y son más susceptibles a desarrollar o agravar enfermedades cardiovasculares y respiratorias.
- Tasa de dependencia económica. Esta variable fue construida a partir de variables de INEGI (2011) y INEGI (2021). Esta se construye como el cociente de la suma de la población de 0 a 14 años y la población de 65 años y más entre el número de personas entre 15 y 64 años. Una alta tasa de dependencia económica implica mayor carga a la población activa para mantener a la población dependiente lo que vuelve más vulnerable a la población en general, pues las personas dependientes requieren de servicios y cuidados que limitan las actividades de la población trabajadora provocando un impacto negativo en la recuperación económica ante afectaciones climáticas, (IMCO, 2012). Por otro lado, los eventos

¹Para los años 2010 y 2020, esta variable se obtuvo al considerar la resta de la población total y la población de 5 años y más, ambas variables se encuentran disponibles en el CENSO 2010 y CENSO 2020.

Tabla 2.1: Estructura del índice de vulnerabilidad climática y variables que lo componen.

VARIABLES	2000	2010	2020	FUENTE	
Subíndice climático					
Tasa de deforestación anual	x	x	x	CONAFOR (2020)	
Cambio y volatilidad de temperatura de cada año (1960-2019)	x	x	x	CONAGUA (s.f.)	
Cambio y volatilidad de precipitación de cada año (1960-2019)	x	x	x		
Subíndice social					
Porcentaje de población de 0 a 4 años	x	x	x	INEGI (2001), INEGI (2011) y INEGI (2021)	
Porcentaje de población con limitación para caminar o moverse	x	x	x		
Porcentaje de población de 65 años o más	-	x	x		
Porcentaje de población femenina	x	x	x		
Porcentaje de viviendas habitadas con acceso a internet	-	x	x		
Porcentaje de viviendas habitadas que disponen de televisión	x	x	x		
Tasa de dependencia económica	-	x	x		Elaboración propia con datos de INEGI (2011) y INEGI (2021)
Índice de marginación	x	x	x		CONAPO (2021d) y CONAPO (2021a)

Nota: x indica que la variable está disponible. - indica la falta de información sobre esa variable para el año correspondiente.

climáticos como las sequías, lluvias e inundaciones pueden provocar un aumento de enfermedades y repercusiones económicas que la población activa deberá enfrentar de manera adicional a solventar los gastos y necesidades de la población dependiente.

- Población femenina. Datos obtenidos del INEGI (2001), INEGI (2011) y INEGI (2021). En el mercado laboral de México menos de la mitad de la población femenina en edad de trabajar tiene un empleo, además de que la mayoría se encuentra en un trabajo informal (Gurría, 2020), también está la existente discriminación salarial a nivel nacional, que indica que la mujer percibe un salario menor en comparación con los hombres que se encuentran en igualdad de condiciones. Además, esta población desempeña la mayor parte del trabajo no remunerado (Mendoza Cota y García Bermúdez, 2009), es por ello que el recuperarse económicamente en caso de una afectación por un fenómeno meteorológico extremo puede resultar más complicado para las mujeres.
- Índice de marginación. La información proviene del Consejo Nacional de Población, los índices 2000 y 2010 se obtienen de CONAPO (2021d) y para el año 2020 de CONAPO (2021a). Este índice tiene como propósito medir el impacto de las carencias de la población como la falta de acceso a la educación, ingresos monetarios insuficientes, residencia en viviendas inadecuadas y en localidades pequeñas (CONAPO, 2021b). Para los años 2000 y 2010, este índice se relaciona de forma directa con el IVC pues al tener un valor bajo significa que el progreso de la población es lento, lo que dificultaría superar el impacto de un fenómeno climático extremo. El índice de marginación del año 2020 está construido con una metodología diferente a los anteriores, de manera que valores grandes indican menos marginación para la localidad. Esto es considerado más adelante en la conformación final del subíndice social de ese año.
- Viviendas con acceso a internet y viviendas que disponen de televisión. La fuente de esta variable es INEGI (2001), INEGI (2011) y INEGI (2021). Al contrario del resto de las variables, estas se relacionan de forma inversa con el IVC, pues el contar con acceso a medios de comunicación facilita el obtener información sobre todo tipo de fenómenos climáticos para así poder actuar con antelación y seguir las recomendaciones de las autoridades.

La construcción de este subíndice considera los porcentajes de las variables: población de 0 a 4 años, 65 y más, mujeres y personas con limitación para caminar o moverse; obtenidos como las proporciones entre cada una y el total poblacional. Por

otro lado, para los porcentajes de viviendas con acceso a internet y las que disponen de televisión, se realizan respecto al total de viviendas habitadas de cada localidad.

2.2.2. El subíndice climático.

Este subíndice comprende información sobre las características ecológicas de cada localidad, así como un análisis sobre el comportamiento meteorológico a lo largo del tiempo, por lo que es necesario disponer de los siguientes datos para su elaboración.

Variables que conforman el subíndice climático

- Tasa de deforestación anual. Este dato fue obtenido de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2020). Esta variable es la proporción de hectáreas deforestadas. La tasa de deforestación tiene un impacto directo sobre el IVC, pues refleja información sobre la degradación de los ecosistemas forestales alterando su funcionamiento y debilitando las barreras naturales de protección para la población.
- Temperatura y precipitación. Datos obtenidos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, s.f.). Contiene información de registro de las estaciones meteorológicas sobre lluvia y temperatura de forma mensual y anual desde 1960 hasta el 2020; esto permite hacer una comparativa del comportamiento y variaciones climáticas en cada lugar.

Un aspecto importante es que para todos los periodos en los que se construye el IVC se toman en cuenta solo aquellas localidades que se encuentran dadas de alta en el Catálogo Único de Claves de Áreas Geoestadísticas Estatales, Municipales y Localidades del INEGI para diciembre del año 2020, esto se aclara pues se presenta el caso en el que hay localidades que se encuentran dadas de alta en un catálogo de claves geoestadísticas para un año en específico pero no para el resto, como es el caso de la localidad 0048 Barrio verde en el municipio 002 Acaxochitlán que se encuentra en el registro del año 2000, pero no para el 2010 y 2020, lo cual limita realizar una comparativa de su vulnerabilidad climática a través del tiempo.

Una vez que se tienen todos los datos anteriores entonces puede seguirse el mismo método establecido por IMCO para la construcción del subíndice climático de cada IVC, pero bajo algunos ajustes. A continuación se describe el tratamiento que se da a cada variable para estimar el IVC.

Indicadores climáticos.

Este subíndice pretende brindar una medida que refleje las características climáticas de una región mediante la elaboración de estadísticos basados en los registros históricos, es por ello que el primer paso a seguir es construir los siguientes indicadores, los cuales permiten observar el cambio del promedio y la volatilidad a través del tiempo bajo una comparativa mensual.

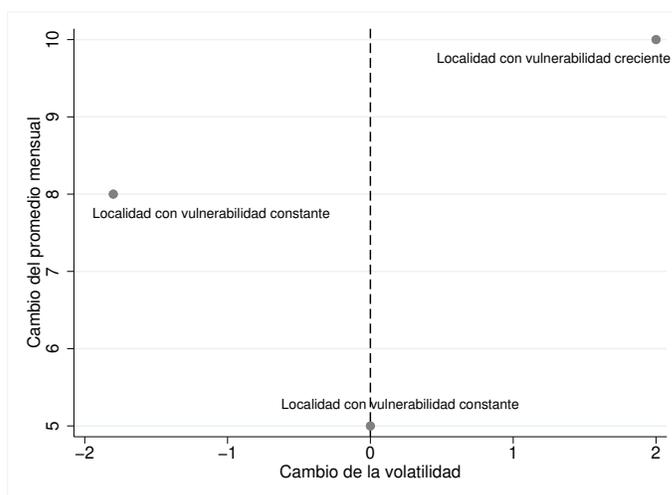
- Promedio mensual de la temperatura y lluvia total para los grupos de años: 1960-1999, 2000-2010 y 2011-2019.
- Desviación estándar mensual de la temperatura y lluvia total para los grupos de años: 1960-1999, 2000-2010 y 2011-2019. En el cálculo de la desviación estándar de todos los grupos de años se hace uso del promedio mensual de temperatura y/o lluvia desde 1960 hasta 2019.

Los promedios mensuales se refieren a aquellos obtenidos al considerar los valores de un mismo mes en todos los años para cada grupo de años, por ejemplo, el promedio de los valores de todos los meses de enero de 1960 a 1999 para cada localidad. Por lo que, al final se cuenta con 12 promedios y 12 desviaciones estándar mensuales para cada grupo de años. Luego, para realizar la comparación de valores entre cada localidad y distinguir variaciones en las variables climáticas se utilizaron los estadísticos anteriores para generar cambios porcentuales entre grupos, es decir, se considera un grupo de control que proporciona información objetiva del comportamiento climático que se presentaba en el estado y después se compara con otro grupo de años que contiene información reciente para poder describir si existen cambios considerables o se ha mantenido un comportamiento regular. En específico se estiman las siguientes variables:

- Cambio porcentual en el promedio mensual de la lluvia o temperatura.
- Cambio porcentual de la desviación estándar mensual de temperatura o lluvia.

Entonces, el impacto del cambio climático en una localidad puede observarse mediante la volatilidad de las variables climáticas (cambio porcentual de la desviación estándar) y su tendencia en el tiempo (cambio porcentual en el promedio mensual). Por ejemplo, en el periodo 1960-1999, enero es un mes con escasa lluvia en promedio, la comparación con el grupo de años 2000-2010 nos permite observar si la tendencia climática se mantiene o no; esto se observa con cambio porcentual del mes de enero entre 1960-1999 y 2000-2010. También debe mencionarse que estos cambios porcentuales se realizaron dos veces cada uno para cada mes, pues, primero se establece

Figura 2.2: Ejemplo de la clasificación de las localidades según su vulnerabilidad



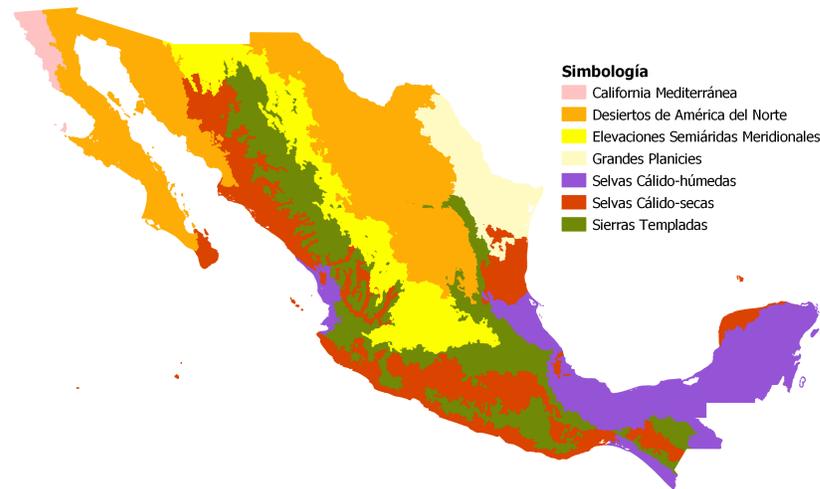
como grupo de control el periodo de 1960-1999 contra el grupo 2000-2010 y luego se repite el procedimiento con el periodo 2000-2010 contra el grupo del 2011-2019.

Posteriormente, con fines de una mejor interpretación de la vulnerabilidad, se considera el valor absoluto del cambio porcentual en el promedio mensual; pues el subíndice busca analizar la vulnerabilidad ocasionada por el cambio climático, donde es poco relevante si las variables climáticas cambian de forma negativa o positiva. Así, los cambios porcentuales de cada localidad generan dos clasificaciones principales de la vulnerabilidad como se muestra en la figura 2.2.

- Localidades con vulnerabilidad constante. Estas son aquellas donde la temperatura y lluvia han variado por el cambio climático, pero su volatilidad no aumenta, es decir, las condiciones climáticas de un mes en específico son parecidas entre sí. Correspondientes a las ubicadas en el cuadrante II en la figura 2.2.
- Localidades con vulnerabilidad creciente. Son aquellas con evidencia de cambios en su clima y cuyas condiciones meteorológicas son poco predecibles (alta volatilidad), ubicadas en el cuadrante I de la figura 2.2.

El siguiente paso corresponde al método de medición de la vulnerabilidad con respecto a los cambios meteorológicos. Siguiendo la discusión previa es natural pensar que si una localidad tiene valores muy pequeños en los cambios porcentuales del promedio mensual y volatilidad de las variables climáticas entonces, es un lugar con un clima predecible pues ha cambiado muy poco en comparación con años pasados y los cambios que pueda presentar no serán inusuales, es decir, es menos vulnerable.

Figura 2.3: Ecorregiones terrestres de México.



Por lo tanto, este método se basa en calcular la distancia euclídeana que hay entre la volatilidad y tendencia climática de cada localidad como par ordenado con respecto al origen (0, 0). Sin embargo, las localidades que se consideran más vulnerables son aquellas donde la volatilidad es positiva, entonces en este caso se considera el doble de la distancia obtenida.

Finalmente en la construcción del subíndice climático para cada IVC deben considerarse los indicadores correctos, ya que no podrían asociarse los resultados de considerar los cambios promedios y desviación estándar entre los grupos 2000-2010 y 2011-2019 para la construcción del IVC del año 2000 pues no consideraría las tendencias climáticas que se presentaban en el estado antes del año 2000. Es por ello que para la construcción del subíndice del año 2000 se utilizan los resultados obtenidos de las comparaciones entre los grupos de años 1960-1999 y 2000-2010, mientras que para el subíndice de los años 2010 y 2020 se consideran los indicadores resultantes de las comparaciones entre los años 2000-2010 y 2011-2019.

Tasa de deforestación.

La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2008) realizó una identificación que define en primer nivel a 7 ecorregiones terrestres en todo el país como se observa en el mapa de la Figura 2.3. A su vez la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2020) ha estimado las tasas de deforestación brutas anuales asociadas a estas ecorregiones para el periodo 2001-2018. Como la información que se requiere es una desagregación por localidades entonces es necesario seguir una

Figura 2.4: Ubicación de las ecorregiones de la Comisión Nacional de Protección a la Biodiversidad

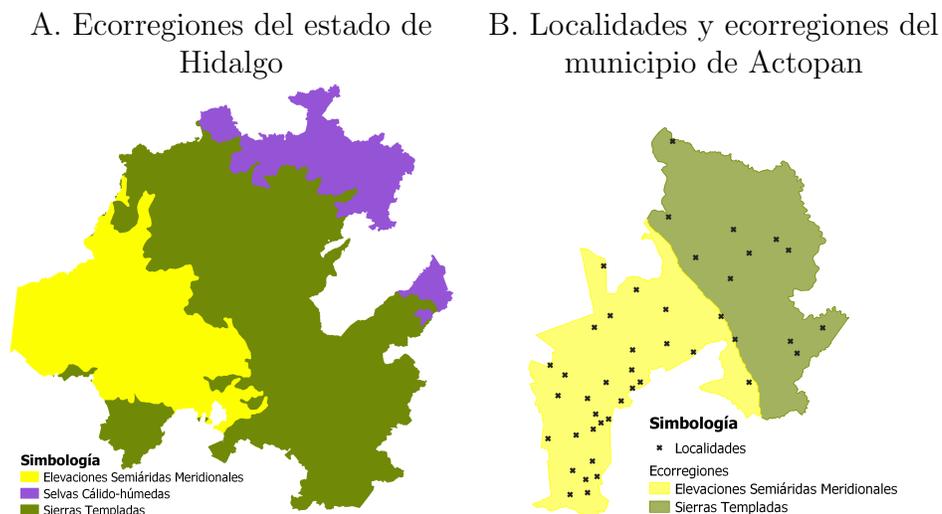


Tabla 2.2: Tasas anuales de deforestación bruta por ecorregión del estado de Hidalgo

Ecorregión	2001	2010	2018
Elevaciones semiáridas meridionales	-	2,890	34,739
Selvas cálido-húmedas	41,418	100,677	72,990
Sierras templadas	15,575	18,171	10,384

Fuente: Fragmento de tabla extraído de CONAFOR (2020).

serie de pasos para obtenerla.

En primer lugar, se identifican las ecorregiones que están comprendidas en el estado. Esto se obtiene realizando una intersección entre capas de información geográfica mediante el programa QGIS, sobre los datos de ecorregiones y la división municipal (CONABIO, 2018), como puede observarse en el panel A de la figura 2.4 en el Estado de Hidalgo hay 3 ecorregiones. Luego, la tabla 2.2 nos muestra el total de hectáreas deforestadas a nivel nacional de cada una. Debido a la periodicidad del Censo de Población y Vivienda y el rango de datos de deforestación, a la información del año 2000 se asigna la tasa correspondiente al 2001, mientras que para el 2020 se considera la tasa del año 2018. Para el año 2010 se considera su tasa correspondiente. El siguiente objetivo es poder identificar a qué ecorregión pertenece cada localidad. Para ello, se realiza una intersección de capas entre las ecorregiones definidas en el estado y

la ubicación de las localidades (INEGI, 2020). Debido a que estas se identifican como puntos geodésicos,² entonces la asignación de cada localidad se realiza considerando en qué zona está ubicado este punto, tal como se muestra en la figura 2.4 B, donde se observa que 12 localidades se ubican en la zona de sierras templadas y 32 en las elevaciones semiáridas meridionales. Finalmente, la tasa de deforestación está dada como el cociente del total de superficie deforestada por ecorregión entre el total de la superficie que abarca la misma,³ este cociente se realiza con la superficie a nivel nacional, sin embargo, ya que el resultado es una proporción de superficie entonces se hace el supuesto de que esta tasa es la correspondiente a cada localidad.

Conformación del índice de vulnerabilidad climática

Para construir el índice se normalizan todas las variables en una escala de 0 a 100 dependiendo del impacto que genere en la capacidad de prevención y respuesta de la localidad ante un efecto climático, así, el peor dato de alguna variable toma el valor de 0 y el mejor toma el valor de 100.

Los subíndices social y climático son el promedio simple de las variables que componen a cada uno, es decir, todos los pesos son homogéneos. Finalmente se considera una ponderación para la composición del IVC, donde el subíndice climático tiene un peso del 62.5 % y el subíndice social del 37.5 % restante. El resultado es un valor escalar para cada localidad.

Se realiza un promedio ponderado de los subíndices de acuerdo a la construcción del equipo de IMCO (2012). Sin embargo, IMCO considera que el subíndice climático tiene un peso del 50 % y los subíndices social y de infraestructura de 25 % cada uno. Como en este trabajo no se cuenta con el subíndice de infraestructura, su peso se distribuye a partes iguales en los dos restantes, obteniendo así los pesos antes mencionados. Por otro lado, es cierto que podría realizarse otro método como el promedio simple, sin embargo, esto puede presentar una mala asignación e interpretación de la vulnerabilidad de cada localidad, es decir, supongamos que se cuenta con una localidad con un valor de

²Los puntos o vértices geodésicos indican las coordenadas para conocer una ubicación geográfica exacta

³Para obtener el total de la superficie a nivel nacional de una ecorregión es necesario considerar la suma de todas las áreas de las regiones comprendidas dentro de cada ecorregión, ya que la CONABIO presenta la información considerando la clasificación de los distintos niveles. Este resultado fue obtenido al utilizar la herramienta **disolver** del programa QGIS 3.22.10 con respecto a la variable que identifica el primer nivel de clasificación que presenta CONABIO (2008)

100 en el subíndice social y 0 en el subíndice climático, esto quiere decir que es una localidad con una gran cantidad de recursos y una población adecuada para hacer frente a cualquier evento climático repentino, pero no solo eso, la parte climática nos indica que su condición climática es estable, es decir, si se identifica un mes con mayor tendencia a lluvia, entonces durante todos los años con los que se cuenta esta condición no cambia, además de que tampoco presenta variaciones considerables en la cantidad de lluvia; por lo que un promedio simple asignaría un valor de 50 para el IVC de esta localidad. Por otro lado, ahora supongamos una localidad con las condiciones contrarias, es decir, con un subíndice social de 0 y un subíndice climático de 100; estos valores nos describen una localidad con muy pocos recursos para sobrellevar un evento extremo además de que sus condiciones climáticas son altamente variables y por tanto poco predecibles. Con lo anterior, esta segunda localidad tendría un valor de 50 en su IVC al considerar un promedio simple y este sería igual al de la localidad 1, lo cual no es razonable, puesto que la segunda localidad tiene mas evidencia a favor de experimentar un evento meteorológico extremo y no ser capaz de recuperarse con la misma velocidad con la que lo haría la localidad 1, es así que se considera dar un mayor peso a la parte climática en la construcción del IVC.

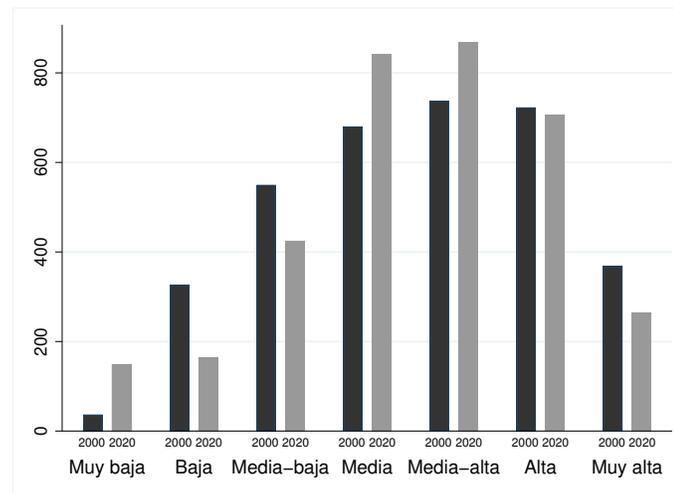
Una vez contando con los 3 índices de vulnerabilidad climática se consideran únicamente las localidades comparables en el tiempo. Luego, resulta natural pensar en realizar una clasificación de las localidades basado en su valor de vulnerabilidad. Siguiendo el análisis del IVC presentado por IMCO (2012) se realiza una categorización del valor del IVC en 7 categorías.

2.3. Resultados del método de clasificación del IVC

Con la estimación del IVC para las localidades del estado de Hidalgo y con la finalidad de obtener un grado de vulnerabilidad se implementa el método de clasificación por k-medias que se describe en la sección 2.4 en el apéndice de este capítulo, sin embargo, el conjunto a clasificar ahora es $X = \{x_i\}_{i=1, \dots, 3421}$, donde x_i es el valor del IVC para la localidad i en un año fijo, por lo que el método se reduce a un análisis unidimensional. Además se empleó $k = 7$ categorías ya que es el número de grupos que considera IMCO (2012). Finalmente cada localidad puede asociarse a una de las 7 categorías de vulnerabilidad climática siguientes: muy baja, baja, media-baja, media, media-alta, alta y muy alta.

En la figura 2.5 se muestra el número de localidades de Hidalgo que se clasifican en cada una de estas categorías. Con la finalidad de observar su cambio a través del tiempo se ponen únicamente las series correspondientes a los años 2000 y 2020, así se

Figura 2.5: Número de localidades por categorías de vulnerabilidad



Nota: distribución del índice de vulnerabilidad climática a lo largo del periodo 2000-2020. Se puede observar que la mayoría de los valores se concentran en las categorías medias y altas.

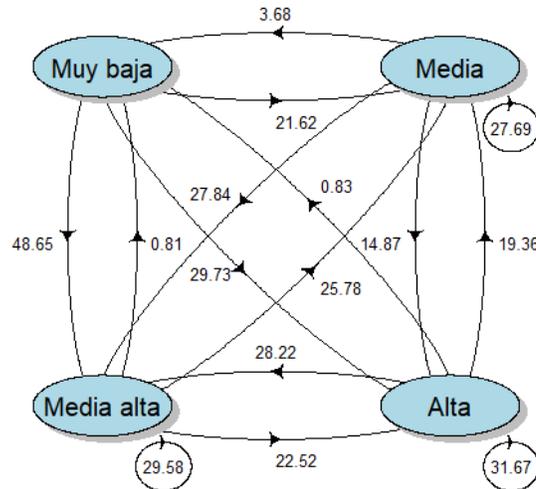
observa un aumento en el número de localidades en las categorías media y media-alta.

De aquí en adelante, para ubicar geográficamente regiones en el estado, se considerará la regionalización por alertas hidrometeorológicas del estado de Hidalgo asignada por la Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana (SSPC, 2019).⁴ Así, para tener una idea más clara de la ubicación geográfica de las localidades con mayor y menor índice de vulnerabilidad climática, en la tabla 2.3 se presenta el nombre de las cinco localidades con mayor y menor vulnerabilidad en los años 2000 y 2020. Se puede notar que, en el año 2000 las localidades con IVC más bajo se ubican en su mayoría en el municipio de Metztlán ubicado en la región centro del estado. Mientras que en el año 2020 se concentran en Huehuetla, es decir, la región este. Luego, las localidades con índice de vulnerabilidad climático más alto en el año 2000 se encuentran principalmente en la región sur y sur-sureste. Así mismo, para el año 2020 las localidades con mayor valor del IVC se ubican en la zona sur.

En la tabla 2.4 se muestra más acerca del comportamiento de transición entre categorías de vulnerabilidad entre el 2000 y 2020, en las filas se presenta la categoría de las localidades en el año 2000 mientras que en las columnas se exhiben las categorías

⁴Esta regionalización divide al estado en regiones que son similares en sus condiciones climatológicas con la finalidad de enfocar los niveles de alerta por eventos climáticos

Figura 2.6: Fragmento del diagrama de transición entre las 4 principales categorías del IVC



Nota: fragmento del diagrama de transición asociado a la tabla 2.4.

del año 2020. Se puede observar que las localidades clasificadas con vulnerabilidad muy baja en el año 2000 fueron más propensas a cambiar a las categorías media-alta y alta para el año 2020. Las menores probabilidades de transición son hacia las categorías bajas en el 2020 desde cualquiera otra del 2000. Lo que implica que las localidades están transitando a niveles altos de vulnerabilidad climática. La figura 2.6, muestra un fragmento del diagrama de transiciones asociado a la tabla 2.4 y que muestra las principales probabilidades entre categorías, como el hecho de que es más probable que las localidades que pertenecían a la categoría de vulnerabilidad alta permanezca en la misma.

Con la finalidad de conocer información sobre la ubicación de las localidades según su transición de vulnerabilidad climática se presenta la tabla 2.5; en esta se muestran las 5 localidades que en el año 2000 pertenecían a la categoría de vulnerabilidad muy baja, pero que para el año 2020 cambiaron a la categoría alta, además se muestran las 5 localidades que en los 20 años de análisis permanecieron en la categoría alta. En el primer caso puede observarse que la mayor parte pertenece a la zona centro del estado correspondiente a Metztlán, mientras que el resto se encuentra en la zona sur. Para las localidades que permanecen en la categoría alta estas se encuentran en su mayoría en la zona sur y este. Además puede observarse que tres de las localidades con el IVC más bajo en el año 2000, como muestra la tabla 2.3 pasaron a categoría

Tabla 2.3: Localidades con el índice de vulnerabilidad climático más alto y más bajo en el estado de Hidalgo en el 2000 y 2020.

Año	Municipio	Localidad	IVC
Índice de vulnerabilidad más bajo			
2000	Metztitlán	La Cumbre Jagüey Seco	53.49
	Metztitlán	Cerro Partido	54.39
	Metztitlán	Pontadhó	54.47
	Metztitlán	Fontezuelas	55.01
	Santiago de Anaya	El Aguacate	55.42
2020	Huehuetla	El Bosque	55.08
	San Bartolo Tutotepec	Llano Seco	55.16
	Huehuetla	Chicontla	56.13
	Huehuetla	La Tuza	56.20
	Acaxochitlán	San Juan	56.38
Índice de vulnerabilidad más alto			
2000	Chapantongo	La Loma	86.92
	Zempoala	El Cristo [Rancho]	87.11
	Huasca de Ocampo	El Tunal	87.17
	Zempoala	Ex-Hacienda de Tecajete	87.72
	Tepeapulco	Quince Hermanos	88.59
2020	Tizayuca	Tepojaco	90.01
	Tulancingo de Bravo	Pedregal de San Francisco	90.09
	Tolcayuca	La Gloria Escondida	90.3
	Atitalaquia	Colonia Refinería	90.4
	Mineral de la Reforma	Jesús Ángeles Contreras	90.84

alta para el año 2020 con un incremento de 27.74 puntos en promedio.

Otra manera de conocer más acerca de las características climáticas de las localidades basados en el IVC se presenta en la figura 2.7, donde se muestran las gráficas correspondientes al promedio anual de la cantidad de lluvia (mm) y temperatura (°C) por categoría de vulnerabilidad climática basado en la clasificación resultante del IVC del año 2000. Así, puede notarse que los lugares con una vulnerabilidad alta poseen los valores promedio más bajos de lluvia y temperatura que para el resto de las categorías, es decir, en el estado de Hidalgo la principal afectación climática del 2000 fue generada en las localidades con poca cantidad de lluvia y temperaturas bajas, en promedio 62 mm y 17 °C respectivamente.

Aunque es cierto que tanto la lluvia y temperatura de las categorías media y baja

Tabla 2.4: Matriz de transición entre categorías de vulnerabilidad climática entre el 2000 y 2020

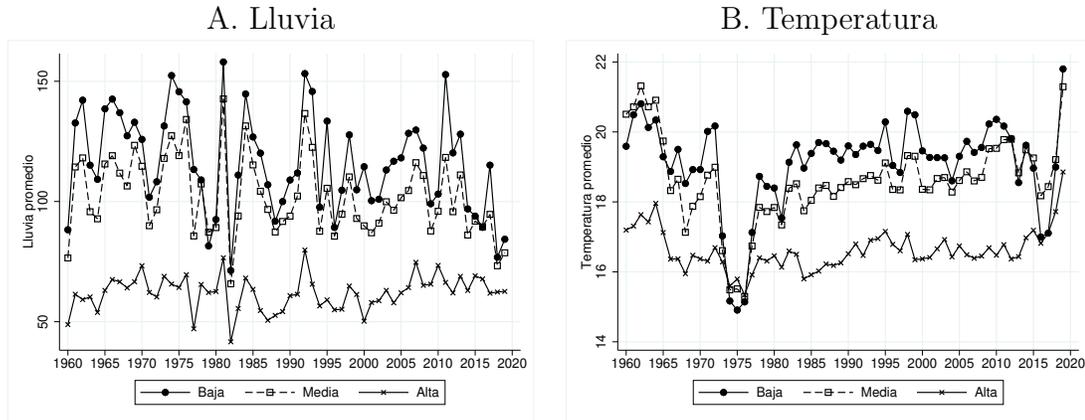
	Muy baja	Baja	Media baja	Media	Media alta	Alta	Muy alta	Total
Muy baja	0	0	0	21.62	48.65	29.73	0	100
Baja	17.43	6.12	19.88	27.83	13.15	13.76	1.83	100
Media baja	10	7.27	18.18	31.27	24.36	6.91	2	100
Media	3.68	6.77	15.17	27.69	27.84	14.87	3.98	100
Media alta	0.81	4.75	8.41	25.78	29.58	22.52	8.14	100
Alta	0.83	2.9	8.02	19.36	28.22	31.67	8.99	100
Muy alta	0	0.82	10.05	14.4	17.12	31.52	26.09	100
Total	4.36	4.82	12.42	24.61	25.4	20.64	7.75	100

Nota: Las probabilidades de transición son obtenidas al contar las transiciones de una categoría a otra y dividido por el total de localidades de la categoría de origen.

Tabla 2.5: Localidades con categoría de vulnerabilidad muy baja en el 2000 que pasaron a categoría alta en el 2020 y localidades que permanecieron en la categoría alta.

Municipio	Localidad	IVC 2000	IVC 2020
Localidades que pasaron de categoría muy baja a alta			
Santiago de Anaya	El Aguacate	55.42	81.91
Metztlán	Pontadhó	54.47	82.18
Metztlán	Cerro Partido	54.39	83.40
Pachuca de Soto	Camelia	63.32	84.21
Metztlán	San Cristóbal	64.31	84.28
Localidades que permanecieron en la categoría alta			
Huasca de Ocampo	San Miguel Regla	82.20	84.83
Tulancingo de Bravo	Buenos Aires	81.73	84.66
Jacala de Ledezma	Jacala	80.18	84.90
Epazoyucan	Barrio de San Juan Tizahuapan	79.66	84.70
Mineral de la Reforma	Francisco Villa	79.62	84.88

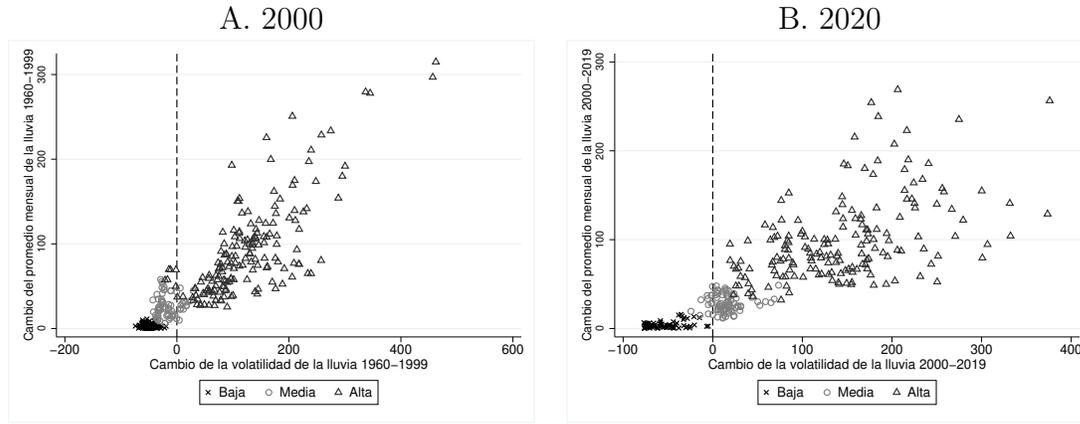
Figura 2.7: Lluvia y temperatura promedio anual según la categorización resultante del IVC en el año 2000.



Nota: la categoría Baja comprende las categorías de vulnerabilidad Muy-baja y Baja, mientras la categoría Media considera las Media-baja, Media y Media-alta. Finalmente la categoría Alta corresponde a las categorías Alta y Muy-alta.

presentan mayores variaciones en comparación con la categoría alta, debe recordarse que estas gráficas son promedios anuales, es decir, no consideran la comparación de tendencias que se realizó para determinar la volatilidad y constancia de la situación climática de una localidad al construir su IVC, para dar un panorama más exacto de esta situación la figura 2.8 muestra precisamente los cambios porcentuales de volatilidad y promedio mensual de la lluvia entre los grupos establecidos por categoría de vulnerabilidad para los años 2000 y 2020, mostrando así, que en efecto las localidades con una alta probabilidad de variaciones climáticas corresponden a localidades clasificadas en esa categoría. Además al comparar ambas gráficas es perceptible que para el año 2020 la categoría de vulnerabilidad alta presenta una mayor dispersión, es decir, el clima se ha vuelto menos predecible.

Figura 2.8: Cambios porcentuales de volatilidad y promedio mensual de lluvia por categorización de vulnerabilidad



Nota: Los puntos en las gráficas fueron seleccionados de manera aleatoria y representan menos del 10% total de datos. Cada punto representa los valores extremos de los indicadores de cambios porcentuales mensuales por localidad, es decir, los puntos de la categoría alta son los valores máximos de esa localidad; los de la categoría media representan la mediana de sus datos y la categoría baja son los valores mínimos.

Apéndice

2.4. Método de clasificación por k -medias.

En el análisis de conglomerados existen distintas técnicas y algoritmos para agrupar objetos de la forma más natural posible, una de estas es la clasificación por k -medias. Esta técnica consiste en dividir un conjunto $X = \{x_n\}$ donde $x_n \in \mathbb{R}^d$, en k grupos con $k < n$, asociando cada elemento al grupo cuya distancia de su media (denominada cetroides) a la observación es mas pequeña.

El método de k -medias sigue un algoritmo iterativo que oscila entre dos pasos, donde el valor de k puede establecerse al comienzo o durante el proceso, es decir, existen dos maneras de comenzar la agrupación:

- Considerando una partición de los datos en k grupos iniciales.
- Especificar k puntos fijos llamados puntos semilla, que funcionarán como centroides de los grupos iniciales.

Una vez determinada la agrupación inicial los pasos a seguir son:

1. Las observaciones se asignan al grupo con el centroide más cercano, determinado por la distancia Euclidiana.
2. Una vez asignados todos los elementos al grupo correspondiente debe obtenerse un nuevo centroide de cada grupo.

El proceso repite ambos pasos hasta que todas las observaciones son asignadas a un grupo y no cambian. Más detalles sobre esta técnica de agrupamiento pueden consultarse en Johnson y Wichern (2007)

Capítulo 3

Fenómeno migratorio humano en el estado de Hidalgo.

Los desplazamientos son motivados por una gran cantidad de factores que van desde lo social hasta lo económico y aunque los efectos de la degradación ambiental no se consideran un factor determinante, si pueden influir en la necesidad de migrar con un efecto multiplicador (Lupián y Campos, 2015). Es cierto que en la actualidad, el cambio climático se está volviendo un objeto de estudio muy importante al tener repercusiones relevantes, en particular, tres impactos son fundamentales al afectar de forma directa las movilizaciones. La primera de las consecuencias es el calentamiento y aridez, provocando sequías, limitando la agricultura y los recursos naturales como el agua. En segundo lugar las catástrofes naturales, como inundaciones o lluvias torrenciales, que pueden provocar movilizaciones masivas. Por último el aumento en el nivel del mar dejará inhabitables zonas costeras (Morton et al. 2008).

Como se discutía previamente, un sin número de términos y definiciones se han planteado en el estudio del impacto del cambio climático, uno de ellos es el de ‘migrantes ambientales’ quien la IOM (2012) define como “personas o grupos de personas que, por razones de cambios repentinos o progresivos del medio ambiente que afectan adversamente su vida o sus condiciones de vida, se ven obligados a abandonar sus lugares de residencia habituales, o decide hacerlo, ya sea con carácter temporal o permanente, y que se trasladan a otro lugar de su propio país o al extranjero” (p. 86).

En la búsqueda de evidencia de efectos del cambio climático sobre la migración del estado el primer paso es analizar las tendencias migratorias existentes, para ello varios autores presentan información sobre las características de los desplazamientos, por ejemplo, Franco Sánchez (2012) describe, con información del CENSO 2000, que la inmigración en los desplazamientos internos se realizan hacia municipios con un

mayor desarrollo económico y, de forma contraria, aquellos con menor recepción de personas son los que poseen un grado de marginación alto. Sin embargo, para los emigrantes internos no se presenta un patrón o tendencia en cuanto al desarrollo del lugar de origen, pues el grado de marginación de estos municipios es variado. También se muestra evidencia de que Hidalgo es una de las principales entidades expulsoras de población hacia Estados Unidos. Esto último puede verse reflejado en los índices de intensidad migratoria México-Estados Unidos donde se expone un grado alto de intensidad para el estado, por lo que las interacciones con el país vecino son de magnitudes considerables (CONAPO, 2012).

De manera general, uno podría pensar que las tendencias de migración en el estado de Hidalgo parecen estar motivadas principalmente por factores económicos, así que, el siguiente paso es plantear una medida de migración y verificar si las variaciones climáticas del estado generan un impacto sobre los desplazamientos, esto utilizando el IVC como medida del cambio climático. Para esto, primero se definen las variables que se emplearán como medida del movimiento migratorio y, en secciones posteriores, se analizarán los resultados de realizar las estimaciones correspondientes a modelos fraccionarios.

3.1. Preliminares

Considerando que el objetivo es analizar la asociación entre la migración y el cambio climático, la manera más simple de estimar esta relación es mediante un modelo de regresión de la forma

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + u_i, \quad (3.1)$$

donde y_i es la medida de migración, x_i es el índice de vulnerabilidad climática observados en la localidad $i = 1, \dots, n$ y u_i es el término de error asociado a este modelo. La estimación de los parámetros β_0 y β_1 se puede realizar por medio del método de mínimos cuadrados ordinarios. Bajo los supuestos de que,

1. En promedio, los términos de error son cero, es decir, $E(u_i|x_i) = 0$,
2. Los términos de error tienen homocedasticidad, esto es, $Var(u_i|x_i) = \sigma^2$,
3. No existe autocorrelación entre los términos de error, en otras palabras, $Cov(u_j, u_k|x_i) = 0$ para todo $i \neq j$

es posible demostrar que los estimadores de mínimos cuadrados son los más óptimos estimadores linealmente insesgados, esto quiere decir que, dentro de la clase de todos

los estimadores lineales insesgados, estos son los que tienen varianza mínima. La demostración puede consultarse en Gujarati y Porter (2010).

Por otro lado, las variables utilizadas para la migración son variables dependientes cuyos valores están en el intervalo $[0,1]$ ya que representan proporciones, entonces uno de los problemas al estimar el modelo 3.1 con esas variables es que la estimación de estas puede estar fuera del intervalo $[0,1]$ y es muy probable la presencia de heterocedasticidad (Wooldridge, 2010).

Para resolver estos problemas se emplearán modelos fraccionarios. Estos modelos se utilizan cuando la variable dependiente está entre $[0,1]$. El modelo a estimar tiene la forma

$$y_i = G(\beta_1 x_i + \beta_0) + u_i \quad (3.2)$$

donde G es una función de distribución. Usualmente G es la distribución logística o normal estándar y además $E(u_i|x_i) = 0$. Con esto se asegura que los estimadores de la migración se encuentren en el intervalo $[0,1]$. En este caso β_1 y β_0 pueden ser estimados consistentemente por métodos de mínimos cuadrados no lineales. Para ello, específicamente se emplea el método de cuasi-verosimilitud en el que se busca resolver el problema de

$$\max_{\beta_0, \beta_1} \ln(L) = \max_{\beta_0, \beta_1} \sum_{j=1}^N [y_j \ln\{G(\beta_1 x_j + \beta_0)\} + (1 - y_j) \ln\{1 - G(\beta_1 x_j + \beta_0)\}], \quad (3.3)$$

donde N es el tamaño de la muestra. Una propiedad importante de la estimación por cuasi-verosimilitud es que no es necesario conocer la distribución del modelo ya que asignar una distribución correcta brinda errores estándar eficientes y no asignarla de forma correcta genera errores estándar asintóticamente no eficientes. Sin embargo, este método de estimación considera por defecto el uso de errores estándar robustos (StataCorp., 2019). Por lo anterior, basta con conocer la especificación correcta del modelo y para ello se deben realizar pruebas de hipótesis como muestra Papke y Wooldrige (1996).

Supongamos que el modelo tiene una forma funcional distinta, es decir:

$$E[y_i|x_i, Z_i] = G(\beta_1 x_i + \beta_0 + \gamma Z_i) := m(\beta_0, \beta_1, x_i, \gamma, Z_i), \quad (3.4)$$

donde Z_i es un vector columna de variables adicionales que pueden ser una expresión no lineal de x_i o no estar relacionadas con esta, y γ es un vector fila de nuevos parámetros. Con lo anterior basta realizar una prueba cuya hipótesis nula es $H_0: \gamma = 0$. Además considerando los supuestos de que

$$E[y_i|x_i, Z_i] = G(\beta_1 x_i + \beta_0), \quad (3.5)$$

$$Var(y_i|x_i, Z_i) = \sigma^2 G(\beta_1 x_i + \beta_0)[1 - G(\beta_1 x_i + \beta_0)]. \quad (3.6)$$

utilizando la notación $G(\beta_1 x_i + \beta_0 + \gamma Z_i) := m(x_i, Z_i, \beta_0, \beta_1, \gamma)$, entonces al realizar las estimaciones de los parámetros $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1$ bajo H_0 se obtienen:

$$\nabla_{\beta_0, \beta_1} \hat{m}_i = \left(\frac{\partial m(x_i, Z_i, \hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \gamma = 0)}{\partial \beta_0}, \frac{\partial m(x_i, Z_i, \hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \gamma = 0)}{\partial \beta_1} \right), \quad (3.7)$$

$$\nabla_{\gamma} \hat{m}_i = \frac{\partial m(x_i, Z_i, \hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \gamma = 0)}{\partial \gamma}. \quad (3.8)$$

Luego al considerar los residuos ponderados

$$\tilde{u}_i = \hat{u}_i / \{G(\hat{\beta}_1 x_i + \hat{\beta}_0)[1 - G(\hat{\beta}_1 x_i + \hat{\beta}_0)]\}^{1/2}, \quad (3.9)$$

también se obtienen los gradientes ponderados

$$\nabla_{\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1} \tilde{m}_i = \nabla_{\beta_0, \beta_1} \hat{m}_i / \{G(\hat{\beta}_1 x_i + \hat{\beta}_0)[1 - G(\hat{\beta}_1 x_i + \hat{\beta}_0)]\}^{1/2}, \quad (3.10)$$

$$\nabla_{\gamma} \tilde{m}_i = \nabla_{\gamma} \hat{m}_i / \{G(\hat{\beta}_1 x_i + \hat{\beta}_0)[1 - G(\hat{\beta}_1 x_i + \hat{\beta}_0)]\}^{1/2}. \quad (3.11)$$

Finalmente al realizar la regresión por mínimos cuadrados ordinarios de \tilde{u}_i en $\nabla_{\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1} \tilde{m}_i$ y $\nabla_{\gamma} \tilde{m}_i$ se obtiene el estadístico NR_u^2 asintóticamente distribuido como χ_m^2 , donde R_u^2 es el valor de r-cuadrada no ajustado y m es la longitud de γ . Con lo anterior puede definirse Z_i de distintas maneras como interacciones o funciones del IVC para comprobar la forma funcional del modelo.

Otro punto importante a considerar sobre estos modelos es la interpretación de sus resultados; en este caso los coeficientes estimados del modelo no representan los efectos marginales de manera directa. Recordemos que el modelo a estimar se encuentra en la ecuación 3.2, el efecto marginal es el cambio observado en la variable de respuesta y ante cambios en la variable x , es decir, el efecto marginal es:

$$\frac{dy}{dx} = \beta_1 g(\beta_1 x + \beta_0) \quad (3.12)$$

donde g es la función de densidad. En este caso se emplea la distribución normal estándar, es decir $G(\beta_1 x + \beta_0) = \Phi(\beta_1 x + \beta_0)$ y $g(\beta_1 x + \beta_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp^{-\frac{(\beta_1 x + \beta_0)^2}{2}}$. Como se puede observar, el coeficiente β_1 proporciona el signo del efecto; además, el efecto marginal depende el valor del IVC. Más detalles sobre las propiedades de los modelos fraccionarios y los métodos de estimación pueden consultarse en Wooldridge (2010).

3.2. Medidas de la migración

Como se mencionó anteriormente, el principal objetivo es poder analizar todos los flujos migratorios del estado de Hidalgo, desde los desplazamientos internos entre sus localidades, con respecto a otros estados e inclusive de forma internacional, sin embargo, los datos en muchas ocasiones son limitados o no poseen las características adecuadas para el enfoque que se requiere, es por ello que las variables de migración utilizadas en este trabajo representan únicamente los movimientos poblacionales hacia Estados Unidos de América. Entonces las métricas utilizadas son: proporción de permanencia, proporción de viviendas con migrantes circulares y proporción de viviendas con migrantes de retorno. Enseguida se mencionará la fuente de cada una de estas variables, así como su descripción. Cada una de estas variables están disponibles para los años 2000, 2010 y 2020.

- Proporción de permanencia. Esta variable se obtuvo de los datos del INEGI (2001), INEGI (2011) e INEGI (2021). Representa la proporción de la población que en cada censo sigue viviendo en su localidad de nacimiento.

Las siguientes variables son componentes del Índice de Intensidad Migratoria para los años 2000 y 2010 (CONAPO, 2015) y para el año 2020 (CONAPO, 2021) con base en los datos del CENSO 2000, CENSO 2010 y CENSO 2020

- Proporción de viviendas con migrantes circulares. Esta variable indica la proporción de viviendas con migrantes circulares en el quinquenio anterior. Donde migrantes circulantes significa que son personas que en cualquier momento del quinquenio previo al levantamiento del censo migraron a EUA, pero que en la fecha del censo ya residían en México
- Proporción de viviendas con migrantes de retorno. Esta variable representa a la proporción de viviendas con habitantes nacidos en México pero que en los cinco años anteriores al levantamiento del censo residían en el extranjero

Con fines descriptivos de la muestra de estudio, en la tabla 3.1 se muestran las características poblacionales promedio por categoría de vulnerabilidad climática. Se puede observar que en el año 2000, las localidades clasificadas con muy baja vulnerabilidad climática tienen un valor promedio de 60.72 en su IVC; además en promedio: tienen 187 habitantes, el 93 % de las personas sigue viviendo en su localidad de nacimiento, el 1.2 % de las viviendas tienen migrantes circulares y el 5.3 % de las viviendas tienen migrantes de retorno.

Tabla 3.1: Características poblacionales promedio por categorías de vulnerabilidad

	Vulnerabilidad climática	Total de población	Permanencia ¹	Migrantes circulares ²	Migrantes de retorno ³
2000					
Muy baja	60.72	187.27	0.93	0.012	0.053
Baja	69.42	1,042.34	0.85	0.011	0.037
Media baja	72.53	324.35	0.96	0.013	0.043
Media	75.36	377.31	0.91	0.018	0.061
Media alta	78.17	587.59	0.88	0.024	0.076
Alta	80.85	741.88	0.85	0.028	0.081
Muy alta	83.59	1,242.51	0.83	0.023	0.066
2020					
Muy baja	62.35	305.17	0.93	0.003	0.046
Baja	68.46	336.10	0.92	0.005	0.069
Media baja	74.38	280.87	0.87	0.013	0.109
Media	77.78	319.13	0.9	0.010	0.103
Media alta	80.39	438.20	0.9	0.009	0.105
Alta	83.21	984.51	0.87	0.007	0.094
Muy alta	86.76	4,275.92	0.77	0.004	0.050

Notas: ¹Representa la proporción de la población que permanece en la localidad de nacimiento con respecto al total poblacional. ²Proporción de viviendas con migrantes circulares. ³Proporción de viviendas con migrantes de retorno.

Por otro lado, en el 2000 la categoría de vulnerabilidad alta presenta los valores promedios más elevados para la proporción de viviendas con migrantes circulares y la proporción de viviendas con migrantes de retorno con el 2.8 % y 8.1 %, respectivamente. Mientras que, para la categoría muy alta, la proporción de permanencia posee el valor promedio más bajo con 83 %. Para el año 2020, los valores promedio más bajos se observan en la categoría de vulnerabilidad muy baja en la proporción de viviendas con migrantes circulares y migrantes de retorno.

3.3. Estimación de la relación entre IVC y migración

En los siguientes apartados se presentaran los resultados estimados de los modelos que estudian la relación entre el cambio climático y la migración, para las tres distintas medidas de migración consideradas. Los modelos se estiman considerando toda la muestra agregada y también por las categorías de vulnerabilidad generadas.

3.3.1. Permanencia

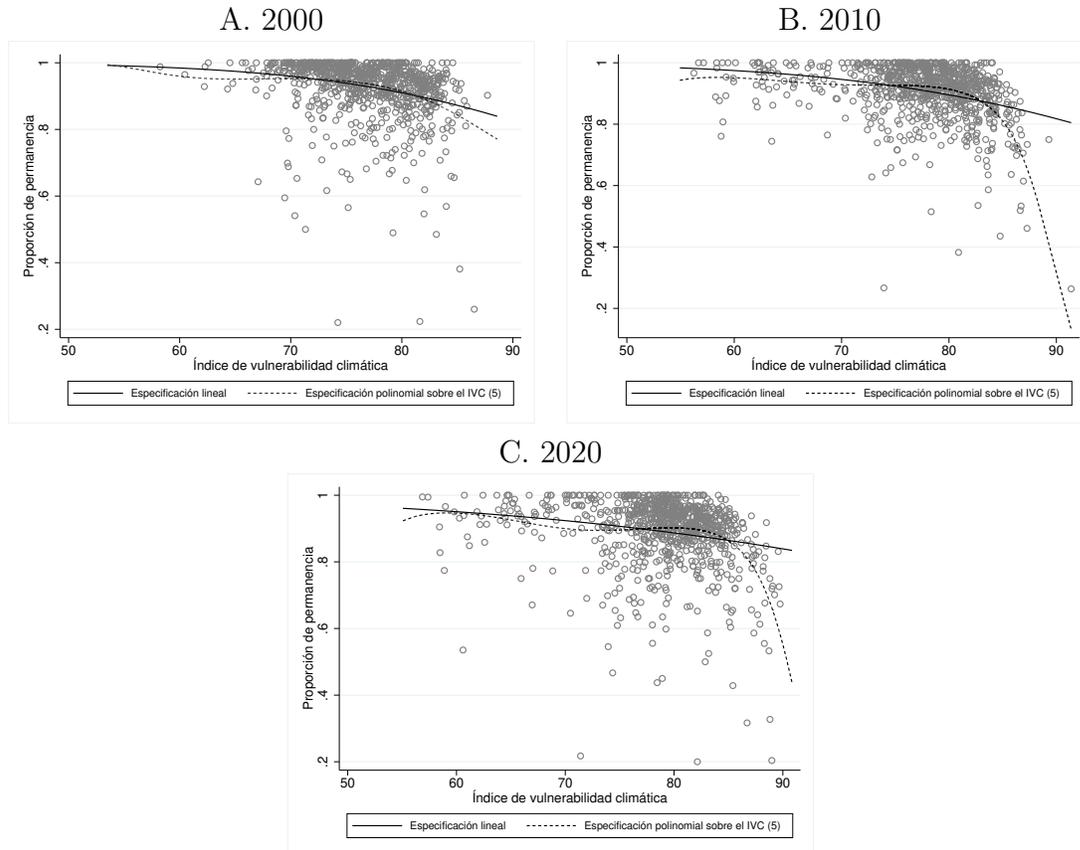
En la figura 3.1 se muestra la relación entre el índice de vulnerabilidad climática y la proporción de permanencia para los años 2000, 2010 y 2020. En las tres gráficas puede observarse un comportamiento similar donde a mayor valor del IVC menor proporción de personas permanecen en su lugar de nacimiento. Además el valor de la pendiente asociado a cada modelo de ajuste va siendo menos pronunciado conforme pasa el tiempo.

Con la finalidad de probar que la especificación lineal del modelo es correcta se supone una forma alternativa polinomial y se realiza la prueba de hipótesis conocida como prueba RESET. En el Apéndice B. tabla B.1 se presentan el estadístico de prueba y el valor p correspondientes al considerar los polinomios del IVC hasta el grado cuatro. Se puede observar que todas estas pruebas se rechazan al 1% de significancia, es decir, se rechaza la hipótesis nula de que la especificación correcta del modelo sea lineal, con ello se tiene evidencia a favor de que los polinomios de grado 2, 3 y 4 en el IVC son estadísticamente significativos. Como muestra de que se preserva la tendencia que sigue la proporción de permanencia sobre el IVC en la figura 3.1 todas las gráficas presentan una línea de ajuste correspondiente al polinomio de grado 5, donde es claro que se mantiene el comportamiento de que al incrementar el valor del IVC este produce menores proporciones de permanencia.

Más aún, la figura 3.2 nos muestra la relación entre la permanencia y el IVC de acuerdo a las categorías de vulnerabilidad climática resultantes. De estas gráficas es más perceptible la relación, pues en categorías altas, las pendientes son más pronunciadas para cualquiera de los años, es decir, ante pequeños cambios del IVC es más baja la proporción de permanencia.

En la tabla 3.3 se presentan los efectos marginales del modelo fraccionario; en esta tabla puede observarse que el 2000 es el único año que tiene efectos marginales significativos hasta antes de la categoría media alta, mientras que para todos los años las categorías altas presentan una relación estadísticamente significativa, corroborando la tendencia negativa entre las variables.

Figura 3.1: Relación entre la proporción de permanencia y el índice de vulnerabilidad climática



Notas: Los puntos en las gráficas son una muestra aleatoria de los datos. La proporción de permanencia es respecto al total poblacional. Se muestran dos líneas de ajuste, una especificación lineal (sólida) y otra polinomial del modelo hasta la quinta potencia del IVC (punteada), como se indica entre paréntesis.

En la categoría muy alta del año 2000, se observa que ante el aumento de un punto sobre el índice de vulnerabilidad climática se reduce en 0.027 la proporción de permanencia, mientras, este efecto aumenta para el año 2010 donde se reduce en 0.046 la proporción de permanencia, sin embargo, este no presenta grandes cambios para el 2020 donde tiene un efecto de 0.048. En la categoría de vulnerabilidad alta la relación entre el IVC y la proporción de permanencia ha oscilado entre -0.013 y -0.009.

Finalmente para las regresiones elaboradas por cada categoría de vulnerabilidad también se realizaron la prueba RESET para cada año, los resultados pueden observarse en las tablas B.2, B.3 y B.4 de donde se concluye que la mayoría de los valores p no rechazan la hipótesis de especificación lineal, con excepción de la categoría media baja para el año 2020. Sin embargo, el comportamiento del polinomio de grado 5 y la línea de regresión lineal para este caso es similar, por lo que con fines ilustrativos en la figura 3.2 C. permanece la línea de ajuste lineal.

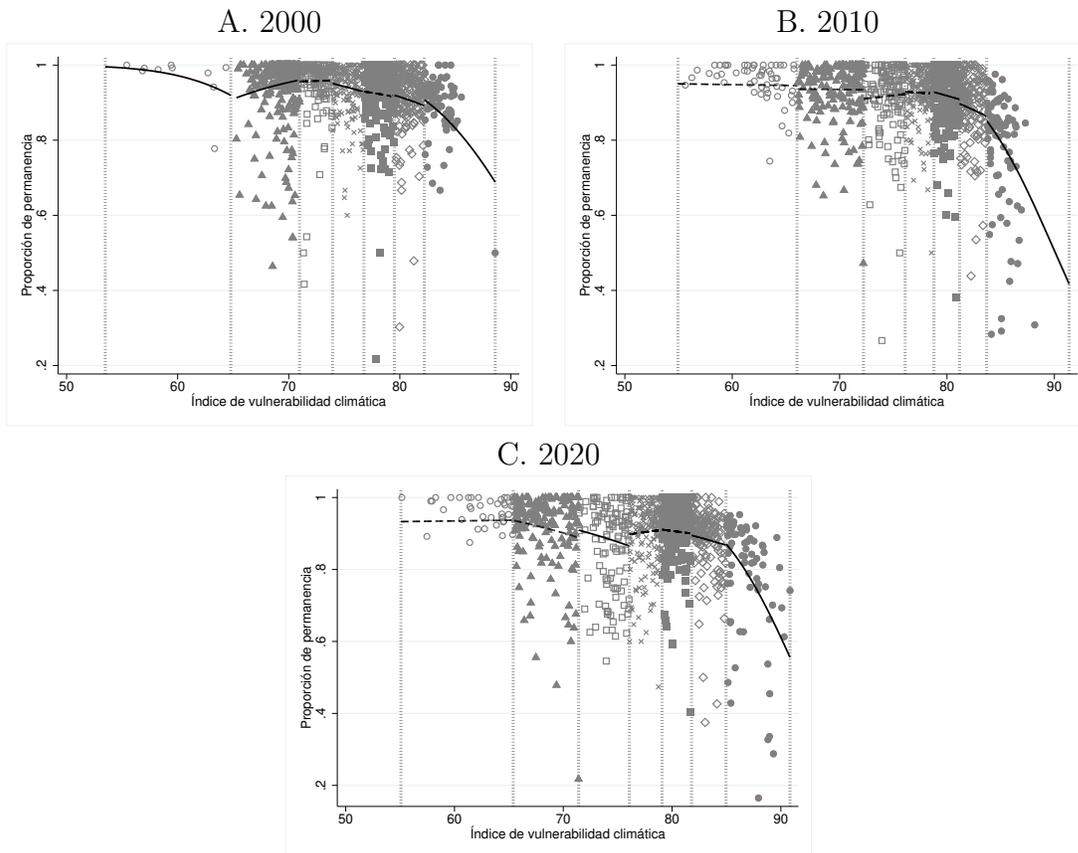
3.3.2. Migrantes circulares

La figura 3.3 nos muestra la relación del IVC y la proporción de viviendas con migrantes circulares. La gráfica del año 2000 muestra una relación positiva, mientras que esta decrece para el año 2010 llegando a tener una tendencia negativa para el 2020, lo que significa que conforme pasa el tiempo a mayores valores del IVC va disminuyendo la tendencia de migrantes que van y vuelven de Estados Unidos.

Además realizando las pruebas RESET para la especificación correcta del modelo se concluye que existe evidencia a favor de que los polinomios de grado 2, 3 y 4 sobre el IVC son significativos para todos los años, por lo que en la figura 3.3 se incluyen las líneas correspondientes a los polinomios de grado 5. Este ajuste permite observar de mejor manera la tendencia de migrantes circulares para cada año y no solo su evolución en el tiempo como lo hace el ajuste lineal, es decir, se observa que ante valores altos del IVC estos corresponden con una menor proporción de viviendas con migrantes circulares.

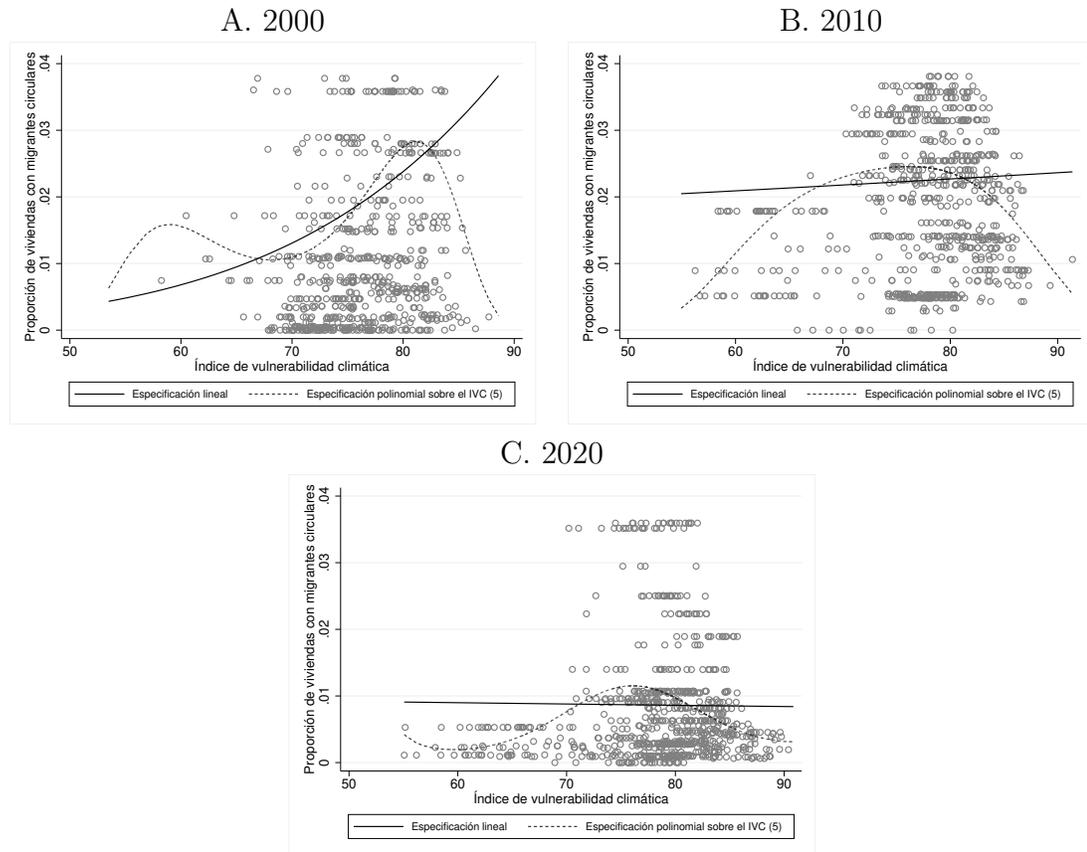
En la figura 3.4, igual que en secciones anteriores, se presentan las gráficas que muestran la relación entre el IVC y la proporción de migrantes circulares por categoría de vulnerabilidad para cada año. Puede observarse que para los años 2010 y 2020 la mayoría de las tendencias asociadas por categoría son significativas, a su vez, para las categorías altas es notable que las tendencias van siendo menos pronunciadas del 2000 hasta el 2020, esto puede corroborarse en la tabla 3.3, donde ante el incremento en un punto del IVC la proporción de migrantes circulares pasa de -0.004 para el año 2000 a -0.003 para el 2010 hasta llegar a -0.001 para el 2020, es decir, para

Figura 3.2: Relación entre la proporción de permanencia y el índice de vulnerabilidad climática por categorías de vulnerabilidad.



Notas: Los puntos en las gráficas son una muestra aleatoria de los datos. La proporción de permanencia es respecto al total poblacional. Las líneas punteadas verticales delimitan los valores extremos de cada categoría de vulnerabilidad, las cuales empiezan de izquierda a derecha con el nivel muy baja, baja, media baja, media alta, alta y muy alta. Las líneas sólidas indican que el coeficiente de regresión es significativo al menos al 10%. Mientras que en las líneas con un patrón de guiones el coeficiente no es significativo al 10%.

Figura 3.3: Relación entre la proporción de viviendas con migrantes circulares y el índice de vulnerabilidad climática



Notas: Los puntos en las gráficas son una muestra aleatoria de los datos. Se muestran dos líneas de ajuste, una especificación lineal (sólida) y otra polinomial del modelo hasta la quinta potencia del IVC (punteada), como se indica entre paréntesis.

estas localidades con vulnerabilidad alta, la proporción de migrantes que vivieron y regresaron de Estados Unidos disminuyó con el paso del tiempo ante el incremento de su vulnerabilidad.

De igual manera en las tablas B.2, B.3 y B.4 se pueden consultar los resultados correspondientes a las pruebas RESET para cada año, donde se observa que la mayoría de los valores p no rechazan la especificación lineal del modelo, con excepción de la categoría media baja para el año 2010. Al igual que en el caso de la permanencia, la tendencia de los polinomios de grado 2 y 3 sobre el IVC muestran un comportamiento similar al ajuste lineal, por lo que este es el que permanece en la figura 3.4 B.

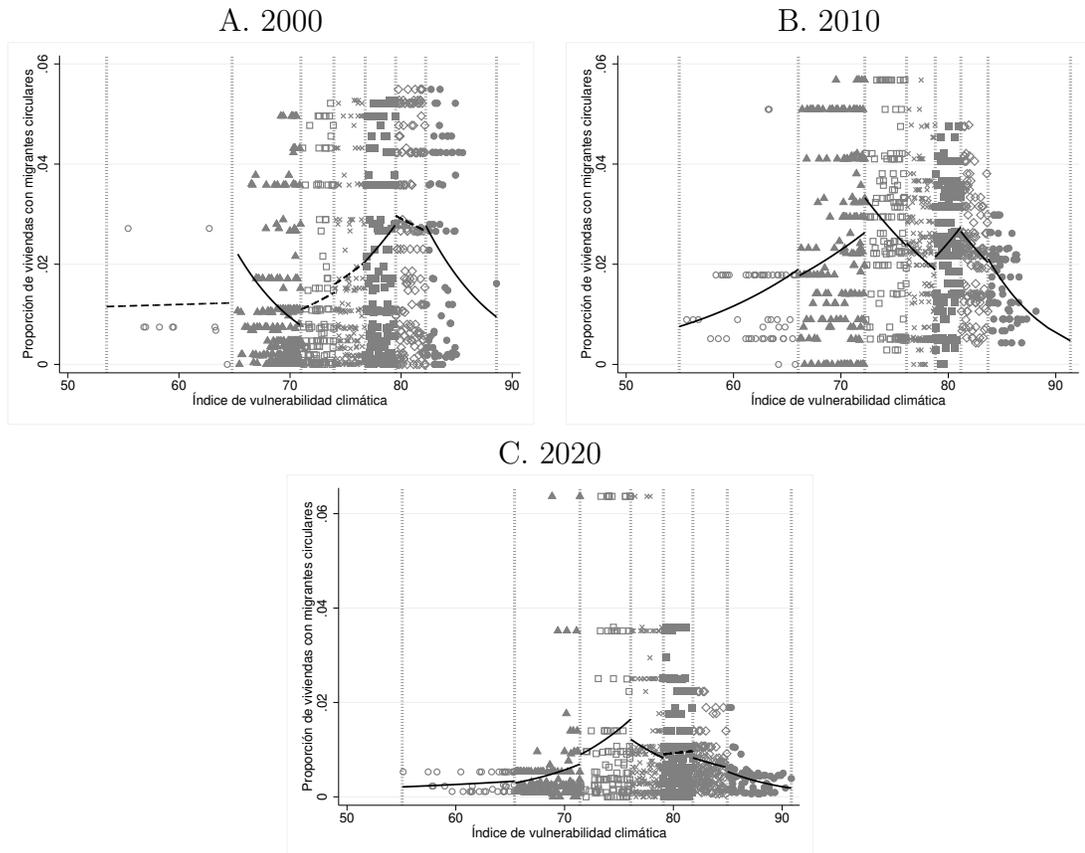
3.3.3. Migrantes de retorno

Como se describió anteriormente, la variable de migrantes de retorno se refiere a la proporción de viviendas con personas nacidas en México, que en el quinquenio anterior residían en EUA, pero en el momento censal ya se encuentran en México. La figura 3.5 expone la relación entre esta variable y el IVC. Es importante mencionar que en todas las gráficas puede observarse una relación positiva con la vulnerabilidad climática, sin embargo, esta relación va cambiando a lo largo del tiempo, como se muestra en la tabla 3.2 que muestra el decrecimiento al tener una asociación de 0.003 en el 2000 y pasar a un incremento de 0.0004 en el 2020, todo bajo un aumento de un punto sobre el valor del IVC.

Aunque la figura 3.5 nos muestra una tendencia positiva entre el IVC y la proporción de viviendas con migrantes de retorno en la figura 3.6 puede observarse de manera más detallada su relación con respecto a las categorías de vulnerabilidad correspondientes. Para los años 2010 y 2020 las categorías muy baja y baja presentan estas tendencias positivas de la relación entre las variables, es decir, ante incrementos de un punto de su valor del IVC la proporción de viviendas con migrantes de retorno aumenta, por ejemplo, para el 2010 en la categoría baja, la proporción de viviendas con migrantes de retorno incrementa 0.005 (al incrementar un punto el valor del IVC), mientras que en el 2020 incrementa 0.009. Por el contrario para las categorías de vulnerabilidad muy alta, hay evidencia estadística de que la tendencia es negativa, como se muestra en la tabla 3.3 donde los efectos sobre la proporción de viviendas con migrantes de retorno oscilan entre -0.010 y -0.008.

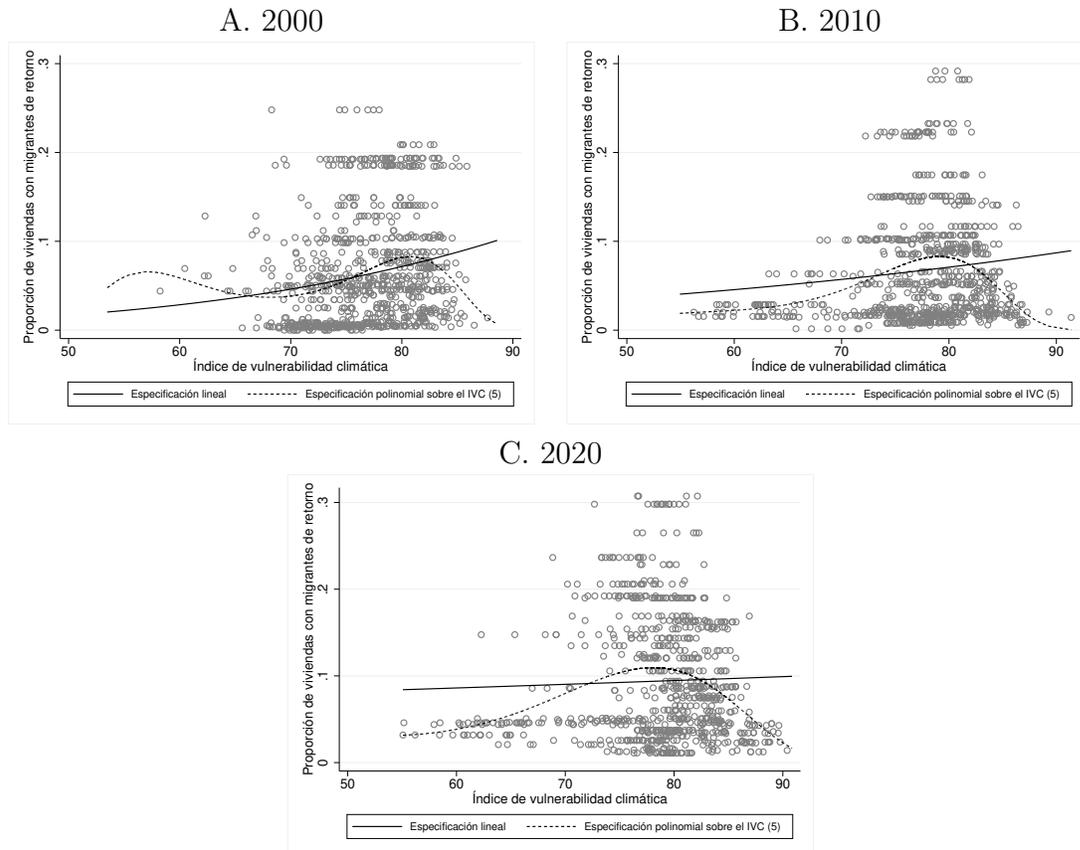
Como en las secciones anteriores la tabla B.1 muestra evidencia a favor de la especificación polinomial del modelo del IVC sobre la proporción de viviendas con migrantes de retorno, por lo que en la figura 3.5 pueden observarse las líneas de ajuste correspondientes a los polinomios de grado 5 para cada año, e igualmente se observa que en niveles muy altos del IVC la proporción de migrantes de retorno es mucho

Figura 3.4: Relación entre la proporción de viviendas con migrantes circulares y el índice de vulnerabilidad climática. Por categorías de vulnerabilidad.



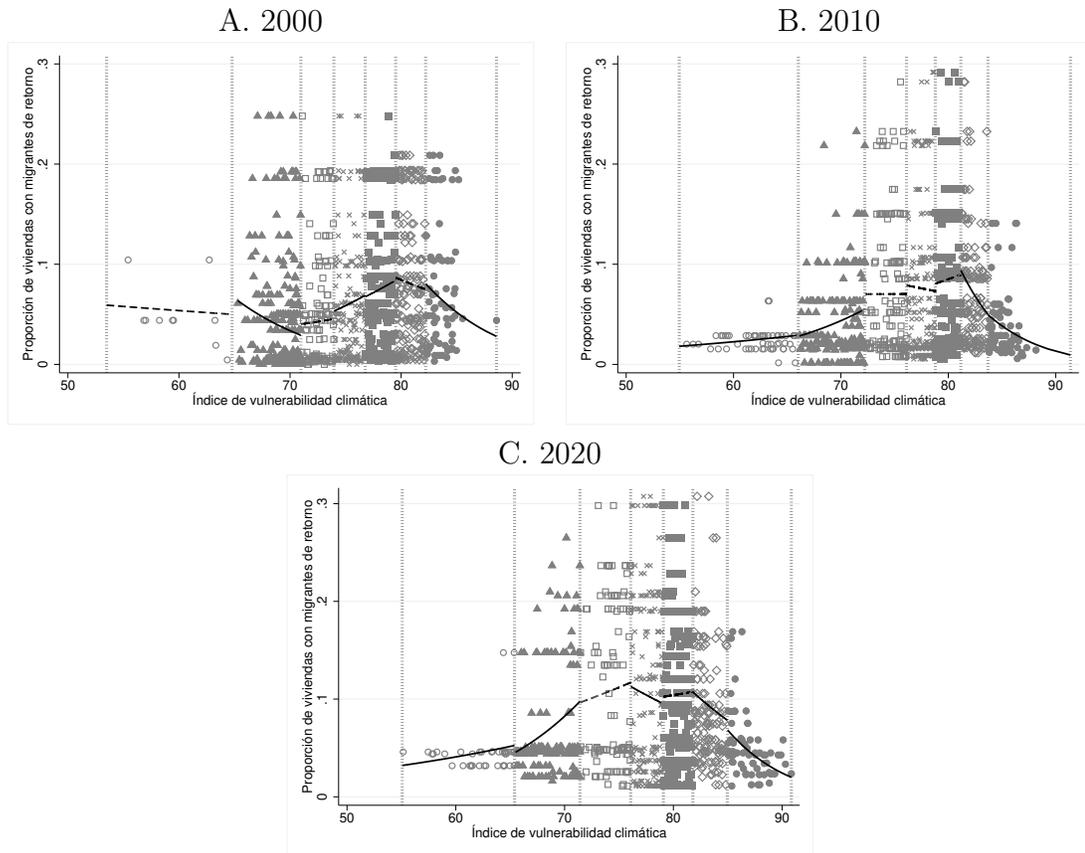
Notas: Los puntos en las gráficas son una muestra aleatoria de los datos. Las líneas punteadas verticales delimitan los valores extremos de cada categoría de vulnerabilidad, las cuales empiezan de izquierda a derecha con el nivel muy baja, baja, media baja, media alta, alta y muy alta. Las líneas sólidas indican que el coeficiente de regresión es significativo al menos al 10%. Mientras que en las líneas con un patrón de guiones el coeficiente no es significativo al 10%.

Figura 3.5: Relación entre la proporción de viviendas con migrantes de retorno y el índice de vulnerabilidad climática



Notas: Los puntos en las gráficas son una muestra aleatoria de los datos. Se muestran dos líneas de ajuste, una especificación lineal (sólida) y otra polinomial del modelo hasta la quinta potencia del IVC (punteada), como se indica entre paréntesis.

Figura 3.6: Relación entre la proporción de viviendas con migrantes de retorno y el índice de vulnerabilidad climática. Por categorías de vulnerabilidad.



Notas: Los puntos en las gráficas son una muestra aleatoria de los datos. Las líneas punteadas verticales delimitan los valores extremos de cada categoría de vulnerabilidad, las cuales empiezan de izquierda a derecha con el nivel muy baja, baja, media baja, media alta, alta y muy alta. Las líneas sólidas indican que el coeficiente de regresión es significativo al menos al 10%. Mientras que en las líneas con un patrón de guiones el coeficiente no es significativo al 10%.

Tabla 3.2: Efectos marginales del modelo fraccionario de la relación entre el IVC y la migración por año.

IVC	Migración		
	Permanencia	Migrantes circulares	Migrantes de retorno
2020	-0.00407*** (0.00040)	-0.00002 (0.00003)	0.00044** (0.00019)
2010	-0.00575*** (0.00043)	0.00009** (0.00005)	0.00144*** (0.00015)
2000	-0.00550*** (0.00040)	0.00117*** (0.00008)	0.00270*** (0.00023)
Observaciones	3,421	3,421	3,421

Notas: *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$. Errores estándar robustos entre paréntesis.

menor.

Por otro lado, ya que las tablas B.2, B.3 y B.4 nos muestra que los valores p de las pruebas RESET no rechazan la hipótesis nula, entonces las gráficas correspondientes contienen las funciones de ajuste al considerar la especificación lineal de los modelos.

Tabla 3.3: Efectos marginales del modelo fraccionario de la relación entre el IVC y la migración por año por categorías de vulnerabilidad.

IVC	Categorías de vulnerabilidad climática						
	Muy baja	Baja	Media baja	Media	Media alta	Alta	Muy alta
Proporción de población de permanencia							
2020	0.000 (0.003)	-0.008 (0.005)	-0.010** (0.004)	0.004 (0.004)	-0.004 (0.004)	-0.009** (0.004)	-0.048*** (0.007)
2010	-0.000 (0.003)	-0.000 (0.003)	0.003 (0.003)	-0.002 (0.004)	-0.008** (0.004)	-0.013*** (0.005)	-0.046*** (0.008)
2000	-0.008** (0.004)	0.007** (0.004)	0.001 (0.004)	-0.008** (0.004)	-0.005 (0.004)	-0.010** (0.005)	-0.027*** (0.006)
Proporción de viviendas con migrantes circulares							
2020	0.000* (0.000)	0.001* (0.000)	0.002** (0.001)	-0.001** (0.001)	0.000 (0.000)	-0.001** (0.000)	-0.001*** (0.000)
2010	0.001*** (0.000)	0.001** (0.001)	-0.002*** (0.001)	-0.002*** (0.001)	0.003*** (0.001)	-0.002*** (0.001)	-0.003*** (0.001)
2000	0.000 (0.000)	-0.002*** (0.001)	0.001 (0.001)	0.002 (0.001)	0.003*** (0.001)	-0.001 (0.001)	-0.004*** (0.001)
Proporción de viviendas con migrantes de retorno							
2020	0.002*** (0.001)	0.009*** (0.002)	0.005 (0.003)	-0.006* (0.004)	0.002 (0.003)	-0.009*** (0.003)	-0.010*** (0.001)
2010	0.001*** (0.000)	0.005*** (0.002)	0.000 (0.002)	-0.002 (0.004)	0.004 (0.004)	-0.018*** (0.003)	-0.008*** (0.002)
2000	-0.001 (0.001)	-0.005** (0.002)	0.002 (0.003)	0.006* (0.003)	0.006** (0.003)	-0.004 (0.003)	-0.010*** (0.003)

Notas: *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$. Errores estándar robustos entre paréntesis.

Conclusiones

Huerta y Zamora (2022) exponen que en los últimos 40 años la temperatura del país ha incrementado entre 0.7 y 1°C provocando una disminución en la cantidad de lluvia, que se ve reflejado en las superficies áridas principalmente al norte del país. Además identifica a México como un país vulnerable ante fenómenos hidrometeorológicos extremos como huracanes, sequías e inundaciones. También pronostican para el año 2050, una pérdida de 19,390 km^2 ante el aumento del nivel del mar afectando principalmente a Yucatán, Campeche y zonas costeras del Golfo de México.

Las variaciones en el clima es un hecho perceptible en México, el Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático (ANVCC) identifica en conjunto con distintas dependencias federales, que las principales amenazas ante el cambio climático son el incremento de temperatura, incremento de la precipitación, disminución de la precipitación y aumento del nivel del mar (INECC, 2019). Todo esto provocará alrededor de 3.1 (2.3 %) millones de personas desplazadas internamente en todo el país, (Huerta y Zamora, 2022).

Con la finalidad de proporcionar evidencia de los posibles efectos del cambio climático sobre la migración, en el presente trabajo se emplean datos de localidades del estado de Hidalgo para analizar la relación entre migración y la vulnerabilidad climática. Por medio de modelos fraccionarios, los resultados presentan evidencia a favor de una relación positiva entre la migración y el cambio climático; la asociación es más grande en aquellas localidades que tienen mayores niveles de vulnerabilidad climática. Estos resultados ya se habían encontrado en otras regiones.

Zacatecas es uno de los principales estados con emigración hacia Estados Unidos, Burson et al. (2010) para abordar el efecto de la variabilidad climática sobre la migración estudian el caso de dos localidades de ese estado: El Tigre y Laguna Seca.¹

¹Los autores obtienen sus datos muestrales por medio de una encuesta aplicada a 100 personas con una variedad de características en edad, niveles socioeconómicos, sexo y personas con familiares migrantes y no migrantes. La encuesta brinda información sobre la percepción de la población del cambio en el clima sobre la temperatura y la cantidad de lluvia; ya que en este estado, la agricultura es una de las principales actividades económicas.

Los autores encuentran que como impacto de variación climática, la mayoría de la población ha percibido un cambio en la temporada de lluvias y su cantidad, por lo que se han vuelto más secas las tierras y por ende se generan grandes dificultades para asegurar los cultivos, es así que en temporadas sin trabajo en la agricultura y debido a las afectaciones las personas reportan una gran cantidad de movilizaciones hacia otras ciudades como Guadalajara, Monterrey y Zacatecas, e inclusive a Estados Unidos y Canadá.

Por otro lado, Albo y Ordaz Díaz (2011) expone distintos trabajos sobre la degradación ambiental en el país, como el aumento de la temperatura, la reducción de la cantidad de lluvia, sequías y desertificación. Además, para mostrar más acerca de la relación entre la migración y el ambiente utiliza como medida de impacto ambiental el índice de degradación de la tierra creado por Campbell y Berry (2003) y para la migración el índice de intensidad migratoria de CONAPO, llegando a la conclusión de que en los estados más pobres hay más tendencia a emigrar cuando la tierra es poco fértil o limitada.

Ante tales efectos del cambio climático es necesario formular estrategias que enfrenten sus repercusiones en la migración planteando políticas que respondan a mediano y largo plazo, no solo después de la movilización al garantizar la integración de los desplazados a la estructura social, proveerlos de vivienda, empleos, servicios sociales y transporte; sino que deben incluir políticas con un enfoque preventivo mediante un desarrollo sostenido, desarrollar mecanismos de adaptación, resiliencia económica, destinar recursos hacia los sectores de la población vulnerable que les permitan hacer frente a tales efectos, así como inversiones en el desarrollo de investigación que muestre evidencia de las tendencias regionales del país.

En México si bien hay instituciones de creación reciente que se encargan de analizar los efectos del cambio climático, como el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y el Sistema Nacional del Cambio Climático (SINACC), resulta que las políticas enfocadas a los desplazamientos por motivos ambientales son escasas o deficientes (Gouritin, 2021).

Este trabajo plantea no solo evidencia a favor de la relación que genera el cambio climático sobre la migración, sino que, de forma sustancial, brinda una medida que identifica un grado de vulnerabilidad climática para las localidades de todo el estado de Hidalgo y que puede extenderse hacia todas las localidades del país con la característica de ser comparable a través del tiempo. Esta medida al tener una agregación más amplia, permite ubicar con precisión las zonas y regiones con probabilidades más altas de tener grandes afectaciones por fenómenos climáticos, no solo extremos, sino que también fenómenos a largo plazo como las sequías, para así poder establecer mejores medidas de prevención, enfrentamiento y adaptación,

ante afectaciones por variaciones climáticas y así disminuir su efecto como factor de desplazamientos.

En relación con la composición de la medida de vulnerabilidad, si bien los resultados presentados muestran una evolución de vulnerabilidad creciente, es decir, a través del tiempo fue posible percibir tendencias de tránsito de localidades con vulnerabilidades bajas a categorías altas y relevantes probabilidades de permanencia en categorías de vulnerabilidad altas, es necesario decir que la limitación de acceso a la información puede tener un gran impacto sobre estos resultados, pues parte del objetivo de la creación del IVC es reflejar los recursos con que dispone la población en la infraestructura del lugar para hacer frente a tales fenómenos climáticos, por lo que el realizar esta medida considerando indicadores que reflejen este ámbito puede generar mejores resultados en el panorama de vulnerabilidad climática.

Bibliografía

- Albo, A. & Ordaz Díaz, J. L. (2011). *Migración y cambio climático. El caso mexicano* (inf. téc. N.º 11/27). BBVA Bancomer.
- Amidror, I. (2002). Scattered data interpolation methods for electronic imaging systems: a survey. *Journal of Electronic Imaging*, 11(2), 157-176.
- Aurenhammer, F. (1991). Voronoi diagrams—a survey of a fundamental geometric data structure. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 23(3), 345-405.
- Bobach, T. & Umlauf, G. (2006). Natural Neighbor Interpolation and Order of Continuity. *VLUDS*, 3-4.
- Bobach, T. A. (2008). *Natural neighbor interpolation-critical assessment and new contributions* (Tesis doctoral). Technische Universität Kaiserslautern.
- Burson, B., Afifi, T. & Jäger, J. (2010). Chapter 8. ‘Buscando la vida’- How do perceptions of increasingly dry weather affect migratory behaviour in Zacatecas, Mexico? *Environment, forced migration and social vulnerability* (pp. 99-113). Springer.
- Campbell, D. & Berry, L. (2003). *Land degradation in Mexico: its extent and impact* (inf. téc.). Por encargo de Global Mechanism con apoyo del Banco Mundial.
- CONABIO. (2008). Ecorregiones terrestres en México. Consultado el 15 de marzo de 2022, desde <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/ecort08gw.html>
- CONABIO. (2018). División política municipal 2018, modificado para el geoportal del SNIB. Consultado el 29 de marzo de 2022, desde <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/municipiosmx.html>
- CONAFOR. (2020). *Resumen ejecutivo. Estimación de la tasa de deforestación bruta en México para el periodo 2001-2018 mediante el método de muestreo* (inf.

- téc.). Comisión Nacional Forestal. Consultado el 10 de diciembre de 2021, desde <https://www.gob.mx/conafor/documentos/estimacion-de-la-tasa-de-deforestacion-bruta-en-mexico-para-el-periodo-2001-2018-mediante-el-metodo-de-muestreo#:~:text=La%5C%20CONAFOR%5C%2C%5C%20con%5C%20apoyo%5C%20de%5C%20diversas%5C%20instituciones%5C%20gubernamentales,oportuna%5C%2C%5C%20a%5C%20trav%5C%2C%5C%A9s%5C%20de%5C%20dos%5C%20enfoques%5C%20metodol%5C%2C%5C%B3gicos%5C%20complementarios>
- CONAGUA. (s.f.). Información estadística climatológica. Consultado el 1 de marzo de 2021, desde <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- CONAPO. (2012). *Índice de intensidad migratoria México-Estados Unidos 2010* (inf. téc.). Consejo Nacional de Población.
- CONAPO. (2015). Índices de intensidad migratoria México-Estados Unidos. Consultado el 20 de mayo de 2022, desde <http://www.omi.gob.mx/es/OMI/Indices>
- CONAPO. (2021a). Índice de marginación 2020. Consultado el 17 de diciembre de 2021, desde <https://www.gob.mx/conapo/documentos/indices-de-marginacion-2020-284372>
- CONAPO. (2021b). *Índice de marginación por entidad federativa y municipio 2020. Nota técnico-metodológica* (inf. téc.). Consejo Nacional de Población.
- CONAPO. (2021c). Índices de intensidad migratoria México-Estados Unidos 2020. Consultado el 20 de mayo de 2022, desde <https://www.gob.mx/conapo/documentos/indice-de-intensidad-migratoria-mexico-estados-unidos>
- CONAPO. (2021d). Índices de marginación 1990-2010. Consultado el 17 de diciembre de 2021, desde <https://www.gob.mx/conapo/documentos/indices-de-marginacion-1990-2010>
- Figuroa Hernández, E., Pérez Soto, F. & Godínez Montoya, L. (2015). La migración y las remesas en México: 1980-2010. *nóesis. Revista de ciencias sociales y humanidades*, 24 (47), 21-49.
- Franco Sánchez, L. M. (2012). *La migración en el estado de Hidalgo, un enfoque de desarrollo regional*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Gouritin, A. (2021). Hacia el reconocimiento político y jurídico del desplazamiento climático en México. Consultado el 10 de noviembre de 2022, desde <https://>

[//migracionesclimaticas.org/hacia-el-reconocimiento-politico-y-juridico-del-desplazamiento-climatico-en-mexico/#:~:text=A%5C%20la%5C%20fecha%5C%2C%5C%20en%5C%20M%5C%2C%5C%A9xico%5C%20no%5C%20hay%5C%20ning%5C%2C%5C%BA%5C%20n,desplazamiento%5C%20interno%5C%20forzado%5C%20impulsado%5C%20por%5C%20el%5C%20cambio%5C%20clim%5C%2C%5C%A1tico](https://migracionesclimaticas.org/hacia-el-reconocimiento-politico-y-juridico-del-desplazamiento-climatico-en-mexico/#:~:text=A%5C%20la%5C%20fecha%5C%2C%5C%20en%5C%20M%5C%2C%5C%A9xico%5C%20no%5C%20hay%5C%20ning%5C%2C%5C%BA%5C%20n,desplazamiento%5C%20interno%5C%20forzado%5C%20impulsado%5C%20por%5C%20el%5C%20cambio%5C%20clim%5C%2C%5C%A1tico)

- Gujarati, D. N. & Porter, D. C. (2010). *Econometría*. McGrawHill.
- Gurría, A. (2020). Gender equality and the empowerment of women for inclusive growth in Mexico. Consultado el 2 de agosto de 2022, desde <https://www.oecd.org/about/secretary-general/gender-equality-and-empowerment-of-women-for-inclusive-growth-mexico-january-2020.htm>
- Huerta, E. G. R. & Zamora, J. A. A. (2022). Cambio climático y migración: actualidad y prospectiva en México y el mundo. *Summa Humanitatis*, 12(1), 73-102.
- IMCO. (2012). *Índice de vulnerabilidad climática de las ciudades mexicanas* (inf. téc.). Instituto Mexicano para la Competitividad A. C. Consultado el 2 de octubre de 2021, desde https://imco.org.mx/indice_de_vulnerabilidad_climatica_boletin_de_prensa/
- INECC. (2019). Construcción del ANVCC. Metodología. *Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático México* (pp. 23-26). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- INEGI. (2001). XII Censo general de población y vivienda 2000. Consultado el 23 de septiembre de 2021, desde <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2000/>
- INEGI. (2011). Censo de población y vivienda 2010. Consultado el 23 de septiembre de 2021, desde <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>
- INEGI. (2020). Catálogo único de claves de áreas geoestadísticas estatales, municipales y localidades. Consultado el 15 de febrero de 2021, desde <https://www.inegi.org.mx/app/ageeml/>
- INEGI. (2021). Censo de Población y Vivienda. Consultado el 23 de septiembre de 2021, desde <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/default.html>
- IOM. (2012). *Diálogo internacional sobre la migración. Cambio climático, degradación ambiental y migración* (inf. téc. N.º 18). Organización Internacional para las Migraciones.

- IOM. (2013). *World migration report 2013. Migrant well-being and development*. (inf. téc.). Organización Internacional para las Migraciones.
- IOM. (2019). *Informe sobre las migraciones en el mundo 2020* (inf. téc.). Organización Internacional para las Migraciones.
- Johnson, R. A. & Wichern, D. W. (2007). Clustering, distance methods and ordination. *Applied Multivariate Statistical Analysis* (pp. 671-755). Pearson Prentice Hall.
- Lucas, G. W. (s.f.). Introduction to natural neighbor interpolation. Consultado el 16 de enero de 2023, desde <https://gwlucastrig.github.io/TinfourDocs/NaturalNeighborIntro/index.html>
- Lupián, L. E. O. & Campos, F. J. A. (2015). Migración y cambio climático en México. *Cimerus*, 10(1), 35-51.
- Mendoza Cota, J. E. & García Bermúdez, K. J. (2009). Discriminación salarial por género en México. *Problemas del Desarrollo. Revista Latinoamericana de Economía*, 40(156), 77-99.
- Morton, A., Boncour, P. & Laczko, F. (2008). Seguridad humana y desafíos políticos. *Revista Migraciones forzadas*, (31), 5-7.
- Papke, L. E. & Wooldrige, J. M. (1996). Econometric methods for fractional response variables with an application to 401 (K) plan participation rates. *Journal of Applied Econometrics*, 11(6), 619-632.
- RAE. (s.f.). *Migración*. En *Diccionario de la lengua española*. Consultado el 18 de octubre de 2022, desde <https://dle.rae.es/migraci%C3%B3n%5C%20?m=form>
- Romo, R., Segura, V., Villasana, D. & Barrón, E. (2021). *Diagnóstico nacional sobre la situación del desplazamiento forzado interno en México* (inf. téc.). Consejo Nacional de Población, CONAPO.
- SSPC. (2019). *Regionalización para alertas Hidrometeorológicas* (inf. téc.). Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana.
- StataCorp. (2019). *Stata 16 Base Reference Manual: fracreg*. College Station. TX: Stata Press.
- Stavropoulou, M. (2008). ¿Un mar de definiciones? *Revista Migraciones forzadas*, (31), 11-12.

- Telsaç, C. & Yürsek, Ö. (2022). Causes of migration and its effects. *2nd International Symposium “Global Migration Phenomenon” With Its Security, Economic, Social, Political and Cultural Dimensions*, 427-433.
- UN. (s.f.). ¿Qué es el cambio climático? Consultado el 10 de octubre de 2022, desde <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change>
- UNICEF. (2022). Desastres naturales: más de la mitad de los afectados son niños. Consultado el 2 de agosto de 2022, desde <https://www.unicef.es/noticia/desastres-naturales-mas-de-la-mitad-de-los-afectados-son-ninos>
- Wooldridge, J. M. (2010). *Econometric analysis of cross section and panel data*. MIT press.

Apéndice A

Tabla A.1: Ubicación geográfica y situación de las estaciones meteorológicas del estado de Hidalgo

Clave	Estación	Municipio	Latitud	Longitud	Situación
13001	ACAYUCA	ZAPOTLAN DE JUAREZ	20.01033800	-98.82206500	suspendida
13002	APAN (DGE)	APAN	19.7100	-98.45194400	operando
13003	CALNALI	CALNALI	20.89717800	-98.58353200	suspendida
13004	ALCANTARILLAS	APAN	19.79640100	-98.38370500	operando
13005	CHARCO DEL ZACATON	EMILIANO ZAPATA	19.6570008000	-98.54741600	suspendida
13006	CIUDAD SAHAGUN	TEPEAPULCO	19.78567400	-98.55366200	suspendida
13007	CORRALEJO	EMILIANO ZAPATA	19.63473300	-98.59360900	suspendida
13008	EL MANANTIAL	TIZAYUCA	19.84972200	-98.92611100	operando
13009	EPAZOYUCAN	EPAZOYUCAN	20.01802200	-98.63620900	suspendida
13010	G. PEDRO MARIA ANAYA	TEPETITLAN	20.15586800	-99.34775000	suspendida
13011	HUEJUTLA	HUEJUTLA DE REYES	21.13921200	-98.42059500	operando
13012	HUICHAPAN	HUICHAPAN	20.37531300	-99.65118100	operando
13013	IXMIQUILPAN (SMN)	IXMIQUILPAN	20.48486800	-99.21877400	operando
13014	LLANO CHICO	EMILIANO ZAPATA	19.61006400	-98.64939200	suspendida
13015	METZQUITITLAN	METZQUITITLAN	20.53260200	-98.63862100	operando
13016	MINERAL DEL MONTE	MINERAL DEL MONTE	20.14049100	-98.67153000	suspendida
13017	EL CHICO	MINERAL DEL CHICO	20.21557100	-98.73122900	suspendida
13018	MIXQUIAHUALA (SMN)	MIXQUIAHUALA	20.22938000	-99.21379800	operando
13019	MOLANGO	MOLANGO	20.78649800	-98.73081400	suspendida
13020	NOPALAPA	EPAZOYUCAN	20.02751600	-98.64733700	suspendida
13021	ORIZATLAN (SMN)	ORIZATLAN	21.17094400	-98.60781500	suspendida
13022	PACHUCA (OBS)	PACHUCA	20.12236000	-98.73700100	operando
13024	POTRERITO	EMILIANO ZAPATA	19.61006400	-98.64939200	operando
13025	PROGRESO	PROGRESO DE OBREGON	20.24819500	-99.18935900	operando
13026	ALFAJAYUCAN (SMN)	ALFAJAYUCAN	20.40997100	-99.34958900	suspendida
13027	SAN JERONIMO	TEPEAPULCO	19.80961300	-98.47515000	operando
13028	SAN MIGUEL ALLENDE	TEPEAPULCO	19.87452500	-98.40561800	suspendida
13029	SAN LORENZO SAYULA	CUAUTEPEC DE HINOJOSA	19.98847800	-98.29752800	operando
13030	SAN RAFAEL MAZATEPEC	CUAUTEPEC DE HINOJOSA	19.86291900	-98.34917100	operando
13031	SANTIAGO TULANTEPEC	SANTIAGO TULANTEPEC	20.03919300	-98.35700600	operando
13032	SANTO TOMAS	ZEMPOALA	19.90278300	-98.56790100	suspendida
13033	SINGUILUCAN	SINGUILUCAN	19.9675	-98.51722200	operando
13034	TENANGO DE DORIA	TENANGO DE DORIA	20.33805600	-98.22672900	operando
13035	TEZONTEPEC (SMN)	TEZONTEPEC DE ALDAMA	19.87986100	-98.81929000	suspendida

Tabla A.1: Ubicación geográfica y situación de las estaciones meteorológicas del estado de Hidalgo

Clave	Estación	Municipio	Latitud	Longitud	Situación
13036	TIZAYUCA (SMN)	TIZAYUCA	19.84108900	-98.98158400	suspendida
13037	TLANALAPA	TLANALAPA	19.81789400	-98.60391300	suspendida
13038	TLANCHINOL (DGE)	TLANCHINOL	20.98333333	-98.65	suspendida
13039	TOLCAYUCA	TOLCAYUCA	19.95659100	-98.92176100	suspendida
13040	TULA (SMN)	TULA DE ALLENDE	20.05522000	-99.34318900	suspendida
13041	TULANCINGO (OBS)	TULANCINGO DE BRAVO	20.08060500	-98.36807300	operando
13042	ZACUALTIPAN (SMN)	ZACUALTIPAN	20.64518100	-98.65362700	operando
13043	ZEMPOALA	ZEMPOALA	19.91539700	-98.66813100	suspendida
13044	ZIMAPAN	ZIMAPAN	20.73806900	-99.38311300	suspendida
13045	APAN (SMN)	APAN	19.7167	-98.4500	suspendida
13046	LAGUNA DE APAN	APAN	19.73464100	-98.49969800	suspendida
13047	TEZONTEPEC (DGE)	TEZONTEPEC DE ALDAMA	19.87986100	-98.81929000	suspendida
13048	TLANCHINOL (SMN)	TLANCHINOL	20.98347400	-98.66461100	operando
13049	LA SOLEDAD (CFE)	TULA DE ALLENDE	20.08042700	-99.35391000	suspendida
13050	ZACUALTIPAN (DGE)	ZACUALTIPAN	20.63320800	-98.66008600	suspendida
13051	JACALA	JACALA DE LEDEZMA	21.00829600	-99.18856900	suspendida
13052	GENERAL PISAFLORES	PISAFLORES	21.19478200	-99.00599700	suspendida
13053	TECOZAUTLA	TECOZAUTLA	20.53387300	-99.63492400	suspendida
13055	IROLO	TEPEAPULCO	19.73234800	-98.59515300	operando
13056	PACHUCA	PACHUCA DE SOTO	20.15062000	-98.73990900	suspendida
13057	ZACATE GRANDE	CHAPULHUACAN	21.11577600	-99.00312800	suspendida
13059	ACATLAN	ACATLAN	20.14590300	-98.43837200	suspendida
13060	ACTOPAN	ACTOPAN	20.26908600	-98.94290100	operando
13061	ALCHOLOYA	ACATLAN	20.22542700	-98.45307900	operando
13062	BINOLA	TEZONTEPEC DE ALDAMA	20.17902000	-99.34285400	suspendida
13063	PRESA BOQUILLA TECOLOTE	IXMIQUILPAN	20.4211	-20.4211	operando
13064	CHAPANTONGO	CHAPANTONGO	20.28531600	-99.41323100	operando
13065	ENCARNACION	ZIMAPAN	20.87656300	-99.20921900	operando
13066	C.E.T.A. 006 MOLANGO	MOLANGO DE ESCAMILLA	20.7942	-98.7344	operando
13067	LOS ALAMOS	METZQUITITLAN	20.13655600	-98.92805600	suspendida
13068	EL SALTO	TEPEJI DEL RIO	19.94388400	-99.28530300	operando
13069	EL MEZQUITAL KM. 150	IXMIQUILPAN	20.433100	-99.149400	operando
13070	SANTUARIO	CARDONAL	20.66245300	-99.13674400	operando
13071	EL TAJO	METZTITLAN	20.4625	-98.67638888	suspendida
13072	E.T.A. 027 NOPALA	NOPALA DE VILLAGRAN	20.25189000	-99.64423800	suspendida
13073	IGNACIO ZARAGOZA	AJACUBA	20.13024300	-99.00151700	suspendida
13074	IXMIQUILPAN (DGE)	IXMIQUILPAN	20.4666667	-99.23333333	suspendida
13075	JASSO	TULA DE ALLENDE	19.99	-98.66777805	operando
13076	JONACAPA	HUICHAPAN	20.43982000	-99.53298600	suspendida
13077	METZTITLAN	METZTITLAN	20.5947	-98.76414400	operando
13078	MIXQUIAHUALA (DGE)	MIXQUIAHUALA	20.2166667	-99.21666666	suspendida
13079	PRESA EL GIRON	SINGUILUCAN	20.0725	-98.65333333	operando
13080	PRESA ENDHO	TEPETITLAN	20.155	-99.35499999	operando
13081	PRESA GOLONDRINAS	ALFAJAYUCAN	20.4405556	-99.37416666	operando

Tabla A.1: Ubicación geográfica y situación de las estaciones meteorológicas del estado de Hidalgo

Clave	Estación	Municipio	Latitud	Longitud	Situación
13082	PRESA LA ESPERANZA	TULANCINGO DE BRAVO	20.0561111	-98.33444444	operando
13083	PRESA MADERO	HUICHAPAN	20.3094444	-99.7225	operando
13084	PRESA REQUENA	TEPEJI DEL RIO	19.9638889	-99.31194444	operando
13085	PRESA TEZOYO	ALMOLOYA	19.8541667	-98.30833333	operando
13086	SANTIAGO TEZONTLALÉ (CFE)	AJACUBA	20.1625	-99.09972222	suspendida
13087	SAN CRISTOBAL	METZTITLAN	20.6413889	-98.82861111	operando
13088	TASQUILLO	TASQUILLO	20.55177200	-99.31255600	operando
13089	TEPEJI DEL RIO	TEPEJI DEL RIO	19.90521700	-99.34181400	operando
13090	RIO SALADO	TEZONTEPEC DE ALDAMA	20.1902778	-99.25472222	operando
13091	TIZAYUCA (DGE)	TIZAYUCA	19.8238889	-98.95444444	operando
13092	TULA (DGE)	TULA DE ALLENDE	20.0566667	-99.34833333	suspendida
13093	VENADOS	METZQUITITLAN	20.4661111	-98.66694444	operando
13094	ACAXOCHITLAN	ACAXOCHITLAN	20.15869300	-98.20324400	suspendida
13095	AGUA BLANCA	AGUA BLANCA DE ITURBIDE	20.34950400	-98.35638600	operando
13096	ATOTONILCO	ATOTONILCO EL GRANDE	20.2808	-98.6586	operando
13097	CHILCUAUTLA	CHILCUAUTLA	20.33096200	-99.23174700	operando
13098	HUASCA	HUASCA DE OCAMPO	20.20361100	-98.57761500	operando
13099	METEPEC	METEPEC	20.23841000	-98.32216400	operando
13100	OMITLAN	OMITLAN DE JUAREZ	20.1695	-98.64863900	operando
13101	SAN BARTOLO	CHAPANTONGO	20.22399100	-99.48990700	suspendida
13104	CHAPULHUACAN	CHAPULHUACAN	21.15941800	-98.90458800	suspendida
13105	CARDONAL	CARDONAL	20.61338900	-99.11706900	operando
13106	AJACUBA (SMN)	AJACUBA	20.0894444	-99.11638888	suspendida
13108	E.T.A. 285 SAN SALVADOR	SAN SALVADOR	20.2800	-99.0208	suspendida
13109	E.T.A. 385 SANTIAGO DE ANAYA	SANTIAGO DE ANAYA	20.3806	-98.9644	operando
13111	AJACUBA (DGE)	AJACUBA	20.0989	-99.1219	operando
13112	MINERAL DEL CHICO	MINERAL DEL CHICO	20.2172	-98.7306	operando
13113	IXMIQUILPAN (CFE)	IXMIQUILPAN	20.4775	-99.2261	operando
13115	REAL DEL MONTE	MINERAL DEL MONTE	20.1331	-98.6692	operando
13116	EL ZEMBO	HUASCA DE OCAMPO	20.1594	-98.5567	operando
13117	SAN AGUSTIN TLAXIACA	SAN AGUSTIN TLAXIACA	20.1147	-98.8861	operando
13118	HUAUTLA (SMN)	HUAUTLA	21.0333	-98.2833	suspendida
13120	CAPULA	IXMIQUILPAN	20.5078	-99.1356	operando
13121	SANTA MARIA AMAJAC	ATOTONILCO EL GRANDE	20.3244	-98.7383	operando
13122	PRESA JAVIER ROJO GOMEZ	ALFAJAYUCAN	20.3739	-99.3264	operando
13123	PRESA EL DURAZNO	SAN AGUSTIN TLAXIACA	20.1333	-98.8592	suspendida
13124	PRESA FELIPE ANGELES	IXMIQUILPAN	20.4981	-99.1231	suspendida
13125	ALFAJAYUCAN (DGE)	ALFAJAYUCAN	20.3803	-99.3503	operando
13127	EL ASERRADERO	CUAUTEPEC DE HINOJOSA	19.9539	-98.3258	operando
13128	TLAXIACA (OCAVM)	SAN AGUSTIN TLAXIACA	20.1147	-98.8861	operando
13129	SAN AGUSTIN ZAPOTLAN	ZEMPOALA	19.8728	-98.7181	operando
13130	SANTA MARIA ASUNCION	TULANCINGO DE BRAVO	20.1547	-98.2739	operando
13131	SANTIAGO TLAJOMULCO	TOLCAYUCA	19.9847	-98.9175	operando
13132	EL TEPOZAN	ALMOLOYA	19.8108	-98.2661	operando

Tabla A.1: Ubicación geográfica y situación de las estaciones meteorológicas del estado de Hidalgo

Clave	Estación	Municipio	Latitud	Longitud	Situación
13133	SAN PEDRO TLAQUILPAN	ZEMPOALA	19.9442	-98.7539	operando
13135	ATLAPEXCO	ATLAPEXCO	21.0194	-98.3481	operando
13137	TEHUATLAN	HUEJUTLA DE REYES	21.0703	-98.4900	operando
13138	EMILIANO ZAPATA	EMILIANO ZAPATA	19.6583	-98.5500	operando
13139	HUAUTLA (DGE)	HUAUTLA	21.0275	-98.2897	operando
13140	JALTOCAN	JALTOCAN	21.1336	-98.5394	operando
13141	LA LAGUNA	SAN FELIPE ORIZATLAN	21.2897	-98.5842	operando
13144	HUEHUETLA	HUEHUETLA	20.4622	-98.0747	operando
13145	ORIZATLAN (DGE)	SAN FELIPE ORIZATLAN	21.1714	-98.5981	operando
13147	EL TIXQUI	CARDONAL	20.7153	-99.1222	operando
13148	XITHA	ZIMAPAN	20.6394	-99.3278	operando
13149	EL BANCO	TEPEJI DEL RIO	19.9603	-99.4572	operando
13150	EL CEREZO	PACHUCA DE SOTO	20.1583	-98.7286	operando
13151	EL ENCINO	SANTIAGO DE ANAYA	20.4564	-98.9106	operando
13152	EL POTRERO	TECOZAUTLA	20.4756	-99.7400	operando
13154	MAGDALENA	ACTOPAN	20.2994	-98.8622	operando
13155	MARAVILLAS	NOPALA DE VILLAGRAN	20.2058	-99.5878	operando
13156	TLAXCALILLA	HUICHAPAN	20.3747	-99.8089	operando
13157	MATZACINTLA	PACULA	21.0378	-99.3000	suspendida
13158	LAS ADJUNTAS	ZIMAPAN	20.7264	-99.4000	suspendida
13159	UNIDAD DE RIEGO LOS ANGELES	ATOTONILCO EL GRANDE	20.2722	-98.6636	operando
13160	TORNACUXTLA	SAN AGUSTIN TLAXIACA	20.1531	-98.8700	operando
13161	PRESA TAXHIMAY II	TEPEJI DEL RIO	19.8417	-99.4075	operando
13162	SANTIAGO TEPEYAHUALCO	ZEMPOALA	19.8483	-98.6708	operando
13164	CAHUAZAS	CHAPULHUACAN	21.1408	-98.8542	operando
13165	LA TRINIDAD	ZEMPOALA	19.9603	-98.7081	operando
13166	TLAHUELILPAN	TLAHUELILPAN	20.1311	-99.2325	operando
13167	ALMOLOYA	ALMOLOYA	19.70331900	-98.40329300	operando
13168	RANCHO NUEVO	ALMOLOYA	19.74752900	-98.27982800	operando

Nota: La clave indicada es la oficial del municipio de acuerdo con INEGI. Las estaciones que se encuentran operando se refiere a que siguen registrando datos hasta el 2022.

Código A.1: Método de interpolación de los datos de lluvia y temperatura, usando el software Matlab.

```

1 % se ingresan los nombres, coordenadas de latitud y longitud de las estaciones
   en los arreglos estacion(k), gpsx(k) y gpsy(k) respectivamente
2 Local=csvimport('HidalgoLocalidades.csv','columns',{'Nom_Loc'});
3 xgpsLoc=csvimport('HidalgoLocalidades.csv','columns',{'Lat_Decimal'});
4 ygpsLoc=csvimport('HidalgoLocalidades.csv','columns',{'Lon_Decimal'});
5 Local = erase(Local, '');
6 xgpsLoc = erase(xgpsLoc, '');
7 ygpsLoc = erase(ygpsLoc, '');
8 xgpsLoc=str2double(xgpsLoc);
9 ygpsLoc=str2double(ygpsLoc);
10 Localidad=Local;Latitud=xgpsLoc;Longitud=ygpsLoc;

```

```

11 TablaL=table(Localidad,Latitud,Longitud);
12 TablaT=table(Localidad,Latitud,Longitud);
13 Archivoinicio=1824;
14 Archivofinal=1974;
15 LongitudTabla=16;
16 TiempoTabla=120;
17 TiempoInicial=2020-TiempoTabla;
18 L=zeros(TiempoTabla,LongitudTabla,Archivofinal-Archivoinicio+1);
19 T=zeros(TiempoTabla,LongitudTabla,Archivofinal-Archivoinicio+1);
20 for i=Archivoinicio:Archivofinal
21     numero= num2str(i); Ruta=strcat('estacion',numero);RutaArchivo=strcat(Ruta,
    '.csv');
22     M = readtable(RutaArchivo);
23     check=ismember('X3', M.Properties.VariableNames);
24     if check==1
25         d=5;
26     else
27         check1=ismember('X2', M.Properties.VariableNames);
28         if check1==1
29             d=4;
30         else
31             d=3;
32         end
33     end
34     % datos de la lluvia
35     clear s; clear s1; clear cond; clear r; clear j;
36     s=string(M.X1)=="LLUVIA TOTAL MEN";
37     s1=find(s==1);[sn,sm]=size(s1);
38     if sn>0
39         j=s1+1;
40         cond="TRUE";
41         while cond=="TRUE"
42             r=M.X1{j};
43             if r~="MINIMA"
44                 j=j+1;
45             else
46                 cond="FALSE";
47             end
48         end
49         S=table2array(M(s1+1:j-1,d:end));[sn,sm]=size(S);
50         L(floor(S(1,1))-TiempoInicial:S(1,1)-TiempoInicial+sn-1,1:sm,i-(
    Archivoinicio-1))=S;
51     else
52         L=table2array(M(5,d+1:end));
53     end
54     % datos de la temperatura
55     clear s; clear s1; clear cond; clear r; clear j;
56     s=string(M.X1)=="TEMP MEDIA MENS.";
57     s1=find(s==1);[sn,sm]=size(s1);
58     if sn>0
59         j=s1+1;
60         cond="TRUE";
61         while cond=="TRUE"
62             r=M.X1{j};
63             if r~="MINIMA"
64                 j=j+1;

```

```

65     else
66         cond="FALSE";
67     end
68 end
69 S=table2array(M(s1+1:j-1,d:end));[sn,sm]=size(S);
70 T(floor(S(1,1))-TiempoInicial:S(1,1)-TiempoInicial+sn-1,1:sm,i-(
Archivoinicio-1))=S;
71     else
72         T=table2array(M(5,d+1:end));
73     end
74 end
75 % interpolacion para los datos de lluvia
76 k=1;l=1;
77 for a=-40:20
78     for mes=1:12
79         for i=Archivoinicio:Archivofinal
80             s=L(100+a,1+mes,i-(Archivoinicio-1));
81             if s>0
82                 estacioncondatosL(k)=L(100+a,1+mes,i-(Archivoinicio-1));
83                 if estacioncondatosL(k)>1500
84                     estacioncondatosL(k)=estacioncondatosL(k)/10;
85                 end
86                 if estacioncondatosL(k) < 0
87                     estacioncondatosL(k)=0;
88                 end
89                 gpsxdatos(k)=gpsx(i-(Archivoinicio-1));
90                 gpsydatos(k)=gpsy(i-(Archivoinicio-1));
91                 k=k+1;
92             end
93         end
94         if k>=5
95             Lk(1)=k;l=l+1;
96             F = scatteredInterpolant(gpsxdatos',gpsydatos',estacioncondatosL');
97             F.Method = 'natural';
98             localidadL=F(xgpsLoc,ygpsLoc);
99
100             for jj=1:max(size(localidadL))
101                 if localidadL(jj) < 0
102                     localidadL(jj)=0;
103                 end
104             end
105             messtring= num2str(mes);
106             aniostring=num2str(2000+a);
107             fecha=strcat('Lluvia de Hidalgo: a o - ',aniostring);
108             fecha=strcat(fecha,'-mes ');
109             fecha=strcat(fecha,messtring);
110             nombre=strcat(aniostring,'-');
111             nombre=strcat(nombre,messtring);
112             TablaL= [TablaL table(localidadL,'VariableNames',{nombre})];
113             clear estacioncondatosL;clear gpsxdatos; clear gpsydatos;
114         end
115         k=1;
116     end
117 end
118 writetable(TablaL,'LluviaLocalidades.csv'
119 % interpolacion para los datos de temperatura

```

```
120 k=1;l=1;aa=-40;
121 for a=-40:20
122     for mes=1:12
123         for i=Archivoinicio:Archivofinal
124             s=T(100+a,1+mes,i-(Archivoinicio-1));
125             if s>0
126                 estacioncondatosT(k)=T(100+a,1+mes,i-(Archivoinicio-1));
127                 if estacioncondatosT(k)>50
128                     estacioncondatosT(k)=estacioncondatosT(k)/10;
129                 end
130                 gpsxdatos(k)=gpsx(i-(Archivoinicio-1));
131                 gpsydatos(k)=gpsy(i-(Archivoinicio-1));
132                 k=k+1;
133             end
134         end
135         if k>5
136             Tk(l)=k;l=l+1;
137             F = scatteredInterpolant(gpsxdatos',gpsydatos',estacioncondatosT');
138             F.Method = 'natural';
139             localidadT=F(xgpsLoc,ygpsLoc);
140             messtring= num2str(mes);
141             aniostring=num2str(2000+a);
142             fecha=strcat('Temperatura de Hidalgo: a o - ',aniostring);
143             fecha=strcat(fecha,'-mes ');
144             fecha=strcat(fecha,messtring);
145             nombre=strcat(aniostring,'-');
146             nombre=strcat(nombre,messtring);
147             TablaT= [TablaT table(localidadT,'VariableNames',{nombre})];
148             clear estacioncondatosT;clear gpsxdatos; clear gpsydatos;
149         end
150         k=1;
151     end
152 end
153 writetable(TablaT,'TemperaturaLocalidades.csv')
```


Apéndice B

Tabla B.1: Resultados de la prueba RESET de especificación correcta para el IVC de forma polinomial.

Año	Grado 2		Grado 3		Grado 4	
	Estadístico	Valor p	Estadístico	Valor p	Estadístico	Valor p
Permanencia						
2000	17.466	2.93E-05	17.594	1.512E-04	17.731	4.99E-04
2010	65.126	7.03E-16	81.928	1.62E-18	98.347	3.52E-21
2020	36.551	1.49E-09	69.303	8.93E-16	69.414	5.7E-15
Migrantes circulares						
2000	12.610	3.836E-04	89.941	2.95E-20	98.090	4E-21
2010	157.610	3.77E-36	159.599	2.21E-35	159.774	2.05E-34
2020	221.332	0	221.346	0	234.096	0
Migrantes de retorno						
2000	7.468	0.006	94.283	3.36E-21	104.788	1.45E-22
2010	269.131	0	296.916	0	297.245	0
2020	272.466	0	290.337	0	290.380	0

Nota: Los valores p muestran que ninguno de los grados de los polinomios son significativos al menos al 1 %.

Tabla B.2: Resultados de la prueba RESET de especificación correcta para el IVC de forma polinomial por categorías de vulnerabilidad para el año 2000.

Categorías de vulnerabilidad	Grado 2		Grado 3		Grado 4	
	Estadístico	Valor p	Estadístico	Valor p	Estadístico	Valor p
Permanencia						
Muy baja	0.024	0.878	1.452	0.484	3.030	0.387
Baja	0.114	0.736	0.117	0.943	0.194	0.979
Media baja	0.832	0.362	0.856	0.652	0.996	0.802
Media	2.438	0.118	2.447	0.294	9.307	0.025
Media alta	1.129	0.288	1.206	0.547	1.352	0.717
Alta	0.156	0.692	0.998	0.607	4.786	0.188
Muy alta	0.217	0.641	0.393	0.822	4.064	0.255
Migrantes circulares						
Muy baja	2.596	0.107	2.599	0.273	2.745	0.433
Baja	0.150	0.698	4.940	0.085	6.269	0.099
Media baja	1.419	0.234	1.642	0.440	1.645	0.649
Media	1.302	0.254	1.526	0.466	1.543	0.672
Media alta	0.790	0.374	1.280	0.527	1.537	0.674
Alta	0.019	0.892	0.081	0.960	1.268	0.737
Muy alta	0.936	0.333	1.991	0.370	2.270	0.518
Migrantes de retorno						
Muy baja	3.079	0.079	3.095	0.213	3.100	0.376
Baja	0.213	0.645	4.905	0.086	5.385	0.146
Media baja	0.620	0.431	1.048	0.592	8.297	0.040
Media	0.604	0.437	2.432	0.296	5.222	0.156
Media alta	1.330	0.249	2.272	0.321	5.385	0.146
Alta	4.162	0.041	4.258	0.119	4.259	0.235
Muy alta	0.669	0.414	2.818	0.244	4.750	0.191

Nota: Los valores p muestran que ninguno de los grados de los polinomios son significativos al menos al 1%.

Tabla B.3: Resultados de la prueba RESET de especificación correcta para el IVC de forma polinomial por categorías de vulnerabilidad para el año 2010.

Categorías de vulnerabilidad	Grado 2		Grado 3		Grado 4	
	Estadístico	Valor p	Estadístico	Valor p	Estadístico	Valor p
Permanencia						
Muy baja	0.347	0.556	0.846	0.655	6.136	0.105
Baja	0.032	0.858	6.135	0.047	6.135	0.105
Media baja	1.348	0.246	1.499	0.473	1.590	0.662
Media	0.105	0.746	0.590	0.745	0.712	0.870
Media alta	0.047	0.829	0.443	0.801	0.472	0.925
Alta	0.075	0.785	0.932	0.628	0.985	0.805
Muy alta	1.540	0.215	1.649	0.439	1.810	0.613
Migrantes circulares						
Muy baja	0.292	0.589	0.374	0.829	0.440	0.932
Baja	0.135	0.713	0.724	0.696	0.813	0.846
Media baja	7.082	0.008	7.805	0.020	8.162	0.043
Media	1.034	0.309	2.258	0.323	3.574	0.311
Media alta	0.555	0.456	0.719	0.698	0.767	0.857
Alta	3.966	0.046	3.974	0.137	4.527	0.210
Muy alta	1.414	0.234	1.488	0.475	1.599	0.660
Migrantes de retorno						
Muy baja	0.185	0.667	0.493	0.782	0.841	0.840
Baja	1.276	0.259	2.030	0.362	2.085	0.555
Media baja	1.765	0.184	2.017	0.365	5.086	0.166
Media	3.431	0.064	6.981	0.030	7.241	0.065
Media alta	0.450	0.502	0.698	0.705	0.700	0.873
Alta	0.488	0.485	0.565	0.754	2.361	0.501
Muy alta	0.293	0.588	1.306	0.520	1.904	0.593

Nota: Los valores p muestran que los grados de los polinomios no son significativos al menos al 1%, con excepción de la variable de migrantes circulares en la categoría de vulnerabilidad media baja para el polinomio de grado dos.

Tabla B.4: Resultados de la prueba RESET de especificación correcta para el IVC de forma polinomial por categorías de vulnerabilidad para el año 2020.

Categorías de vulnerabilidad	Grado 2		Grado 3		Grado 4	
	Estadístico	Valor p	Estadístico	Valor p	Estadístico	Valor p
Permanencia						
Muy baja	3.008	0.083	3.566	0.168	4.107	0.250
Baja	0.387	0.534	0.409	0.815	1.247	0.742
Media baja	11.186	0.001	11.996	0.002	12.292	0.006
Media	0.137	0.711	1.208	0.547	3.795	0.284
Media alta	0.707	0.400	0.747	0.688	7.327	0.062
Alta	1.098	0.295	1.725	0.422	1.752	0.626
Muy alta	1.544	0.214	5.740	0.057	5.859	0.119
Migrantes circulares						
Muy baja	0.529	0.467	0.656	0.720	1.866	0.601
Baja	0.361	0.548	1.697	0.428	9.737	0.021
Media baja	2.053	0.152	2.123	0.346	2.318	0.509
Media	0.255	0.613	3.161	0.206	3.263	0.353
Media alta	1.233	0.267	1.458	0.482	1.743	0.627
Alta	1.934	0.164	1.959	0.375	3.279	0.351
Muy alta	2.998	0.083	4.269	0.118	4.425	0.219
Migrantes de retorno						
Muy baja	1.378	0.240	3.319	0.190	3.412	0.332
Baja	0.738	0.390	0.782	0.676	1.794	0.616
Media baja	0.112	0.737	0.283	0.868	0.437	0.933
Media	0.020	0.888	3.497	0.174	3.647	0.302
Media alta	0.001	0.981	1.024	0.599	1.034	0.793
Alta	0.032	0.859	3.601	0.165	5.122	0.163
Muy alta	1.202	0.273	2.713	0.258	2.876	0.411

Nota: Los valores p muestran que los grados de los polinomios no son significativos al menos al 1%, con excepción de la variable de permanencia en la categoría de vulnerabilidad media baja.