

Relación dinámica entre temperatura y precipitación pluvial en las regiones de México

Oswaldo Urbano Becerril Torres¹

Gabriela Munguía Vázquez²

Gerardo Enrique del Rivero Maldonado³

Resumen

La temperatura y la precipitación pluvial, dos variables que interaccionan entre ellas y tienen incidencia en el cambio climático son objeto de estudio en esta investigación. Su relación ha sido ampliamente probada en estudios en diferentes países, a través de análisis correlacionales, sin embargo, son casi nulos para México. Así, la existencia de este hueco analítico para este país restringe su entendimiento y lo profundiza, si no es posible construir escenarios que permitan anticipar eventuales sucesos generados por shocks no predecibles, como las ondas de calor acontecidas en México a finales de la primavera del año 2024 o las fuertes precipitaciones a inicio de verano del mismo año.

Por ello, el objetivo de esta investigación es determinar el efecto de shocks que incidan en la temperatura y la precipitación. Para alcanzarlo se hace uso de la econometría de series de tiempo para construir un vector autorregresivo, y con ello, la función de impulso respuesta, que permite identificar la magnitud y temporalidad de los impactos. Entre los principales hallazgos se encuentra que se ha identificado la existencia de efectos transitorios, permanentes y nulos entre ambas variables. En el caso de la región norte, un shock en la innovación⁴ $\epsilon_{t,1}$ aumenta la precipitación promedio, observándose un efecto transitorio, y efectos nulos sobre la temperatura. Un shock en la innovación $\epsilon_{t,2}$ genera un efecto persistente que se diluye con el paso del tiempo.

Para la región centro, un shock en la innovación $\epsilon_{t,1}$, genera un efecto transitorio sobre la precipitación, en tanto que la temperatura muestra un efecto persistente. Un shock en $\epsilon_{t,2}$, tiene un efecto nulo en la precipitación, pero un efecto persistente en la temperatura, que se diluye con el paso del tiempo. Para la región sur, un shock en la innovación $\epsilon_{t,1}$, reporta un efecto transitorio en precipitación, pero nulo sobre la temperatura. Un shock en la innovación $\epsilon_{t,2}$, no tiene efecto significativo en la precipitación promedio de la región, sin embargo, se observa un efecto persistente en la temperatura. Así, la función impulso respuesta ha permitido caracterizar el alcance y magnitud de un shock en las innovaciones, lo que abre la posibilidad de predecir el comportamiento de la temperatura y la precipitación pluvial en las regiones de México.

Conceptos clave: vectores autorregresivos, precipitación pluvial, temperatura.

¹ Doctor. Universidad Autónoma del Estado de México. obecerrilt@uaemex.mx.

² Doctora. Universidad Autónoma del Estado de México. gmunguiav@uaemex.mx

³ Doctor. Universidad Autónoma del Estado de México. gedelriverom@uaemex.mx

⁴ En el contexto de la econometría de series de tiempo, en el ámbito del análisis con vectores autorregresivos, el término “innovación” es ampliamente usado para hacer referencia a lo que en econometría tradicional se conoce como término de perturbación estocástica, cuya representación en una aplicación empírica son los residuales.

Introducción

El cambio climático no es un acontecimiento reciente, sin embargo, las alteraciones en el clima se han sentido de manera relevante en los años recientes, y han sido más visible en el 2024 tras ondas de calor muy significativas, o inundaciones en el hábitat de los seres humanos. Ello hace relevante seguir estudiando los fenómenos climáticos y, en la medida de los alcances de la ciencia, tratar de remediar, prevenir o pronosticar lo que podría venir, a través de la elaboración de una prospectiva climática, al objeto de desarrollar en el ser humano la capacidad de resiliencia ante estos sucesos.

No es desconocido que el cambio climático es producto de alteraciones en las variables que influyen sobre el clima, tales como la temperatura, la precipitación pluvial, el viento y la presión atmosférica. Los climatólogos dan cuenta de ello. Las interacciones entre estas variables en un tiempo determinado en una unidad territorial lo definen. Es por esto que resulta relevante continuar elaborando estudios que aporten información para el entendimiento de sus interrelaciones y, de ser posible, permitan documentarlas. La interrelación entre precipitación y temperatura ha sido estudiada ampliamente en diferentes contextos de algunos países, cuya característica común ha sido que dichos análisis se han realizado a través de correlaciones estadísticas, encontrando relaciones directas o inversas, justificadas a partir de las propias condiciones de temperatura y humedad, generada, entre otras variables, por las precipitaciones pluviales.

Así, por ejemplo, de acuerdo al *Intergovernmental Panel on Climate Change* (2007), (IPCC), los cambios observados en la temperatura y las precipitaciones regionales a menudo pueden estar físicamente relacionados entre sí, es decir, que existe una justificación para pensar que se puede identificar alguna correlación estadística entre ellas. Un elemento que puede incidir en la correlación de estas variables es la estación del año, como reconoce el IPCC expresando que, en la estación cálida en los continentes, las temperaturas más altas van acompañadas de menores precipitaciones y viceversa. Por lo tanto, en tierra firme dominan fuertes correlaciones negativas, ya que las condiciones secas favorecen más luz solar y menos enfriamiento por evaporación, mientras que los veranos húmedos son frescos. Otro factor que incide sobre las correlaciones es la latitud. Por ejemplo, de acuerdo al IPCC, en latitudes de 40° hacia el polo en invierno, dominan las correlaciones positivas, por la capacidad de retención de agua de la atmósfera.

Así, para contribuir al entendimiento de las relaciones entre precipitación pluvial y temperatura, se plantea, en esta investigación, analizar la acción y reacción que se da en/entre estas variables ante un shock provocado por algún acontecimiento no previsto, como por ejemplo, las olas de calor vividas a finales de primavera de 2024 en México, o las fuertes precipitaciones a inicio de verano del mismo año, y determinar si el efecto es transitorio, persistente o nulo. Para ello, se emplea la metodología de Vectores Auto Regresivos, y la Función de Respuesta al Impulso. Así, en el apartado dos se presenta el marco teórico que orienta la aplicación empírica, en el apartado tres se muestra el estado del objeto de estudio, donde se identifica que existen diversos estudios que correlacionan las variables de precipitación y temperatura en diferentes contextos, pero que son escasos para México. En el apartado cuatro se presenta la metodología a emplear en la aplicación empírica para, en la sección cinco presentar, los principales hallazgos y, finalmente, las conclusiones.

Marco teórico

La precipitación es definida como la formación líquida proveniente del proceso de condensación atmosférica y que es precipitado en la superficie terrestre para continuar el ciclo hidrológico

(Fundación Aquae, 2020); y la temperatura es definida como indicador del grado de calor que presenta el aire (Polanco, 2017), calor que es generado por la energía cinética de las moléculas del aire (Agustín, 2015).

Respecto a la teoría econométrica se puede establecer que una forma vectorial autorregresiva reducida (VAR), expresa cada variable como una función lineal de los rezagos de todas las variables del sistema y un término de error o innovación. Si hay p rezagos.

La representación matemática de un VAR es:

$$y_t = A_1 y_{t-1} + \dots + A_p y_{t-p} + B x_t + \epsilon_t \quad (1)$$

Donde y_t es un vector de variables endógenas contemporáneas, x_t es un vector de variables exógenas, A_1, \dots, A_p y B son matrices de coeficientes a estimar, y ϵ_t es un vector de innovaciones que pueden estar correlacionadas contemporáneamente, pero no están correlacionadas con sus propios valores rezagados y no están correlacionadas con todas las variables del lado derecho. IHS Global (2016, p. 643).

Dado que sólo aparecen valores rezagados de las variables endógenas en el lado derecho de las ecuaciones, la simultaneidad no es un problema y el cálculo de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) produce estimaciones consistentes. Además, aunque las innovaciones ϵ_t pueden estar correlacionadas contemporáneamente, MCO es eficiente y equivalente a Mínimos Cuadrados Generalizados, ya que todas las ecuaciones tienen regresores idénticos. IHS Global (2016, p. 643).

El determinante de la covarianza residual se calcula como:

$$|\Omega| = \det\left(\frac{1}{T-p} \sum_t \hat{\epsilon}_t \hat{\epsilon}_t'\right) \quad (2)$$

Donde p es el número de parámetros por ecuación en el VAR. El cálculo no ajustado ignora el valor de p . El valor del logaritmo de verosimilitud se calcula suponiendo una distribución normal multivariada (gaussiana) como:

$$l = -\frac{T}{2} \{k(1 + \log 2\pi) + \log |\Omega|\} \quad (3)$$

$$AIC = -2l/T + 2n/T \quad (4)$$

$$SC = -2l/T + n \log T/T \quad (5)$$

Donde $n=k(d+pk)$ es el número total de parámetros estimados en el VAR. Estos criterios de información se pueden utilizar para la selección de modelos, como por ejemplo para determinar la longitud del retraso del VAR, prefiriéndose valores más pequeños del criterio de información. Vale la pena señalar que algunas fuentes de referencia pueden definir el Criterio de Akaike/Criterio de Schwarz de manera diferente, ya sea omitiendo los términos constantes "no esenciales" de verosimilitud o no dividiendo por T . IHS Global (2016, p. 645, 646).

El VAR estimado es estable (estacionario) si todas las raíces tienen un módulo menor que uno y se encuentran dentro del círculo unitario. Si el VAR no es estable, ciertos resultados (como

los errores estándar de respuesta al impulso) no son válidos, como se indica en IHS Global (2016, p. 646).

Si el VAR es estacionario, cualquier respuesta a cualquier impulso en t debe ser transitoria. Y eso sucede si y sólo si todos los valores propios VAR están dentro del círculo unitario. Si el VAR tiene sus raíces dentro del círculo unitario, es estable. Si la mayor de las raíces tiene un valor cercano a uno, las respuestas al impulso tienden a ser muy persistentes. Romero (2022).

La función Impulso-Respuesta

Un shock en la i -ésima variable no solo afecta directamente a la i -ésima variable, sino que también se transmite a todas las demás variables endógenas a través de la estructura dinámica (retraso) del VAR. Una función de respuesta al impulso rastrea el efecto de un shock único en una de las innovaciones sobre los valores actuales y futuros de las variables endógenas. IHS Global (2016, p. 651).

Si las innovaciones no están simultáneamente correlacionadas, la interpretación de la respuesta al impulso es sencilla. La i -ésima innovación $\epsilon_{i,t}$ es simplemente un shock para la i -ésima variable endógena $Y_{i,t}$. Sin embargo, las innovaciones suelen estar correlacionadas y se puede considerar que tienen un componente común que no puede asociarse con una variable específica. Para interpretar los impulsos, es común aplicar una transformación a las innovaciones para que dejen de correlacionarse:

$$v_i = P\epsilon_t \sim (0, D) \quad (6)$$

Donde D es una matriz de covarianza diagonal. IHS Global (2016, p. 651).

Para los VAR estacionarios, las respuestas al impulso deberían extinguirse hasta llegar a cero y las respuestas acumuladas deberían realizar una asíntota a alguna constante no cero.

El Impulso ofrece la siguiente opción para transformar los impulsos: Cholesky utiliza el inverso del factor de Cholesky de la matriz de covarianza residual para ortogonalizar los impulsos. Esta opción impone un orden de las variables en el VAR y atribuye todo el efecto de cualquier componente común a la variable que aparece primero en el sistema VAR. IHS Global (2016, p. 653).

Estado del objeto de estudio

Si bien el análisis del clima es complejo para las interacciones que se dan entre humedad, precipitación pluvial, temperatura ambiente, presión atmosférica y viento, se han realizado esfuerzos a nivel internacional para entender, caracterizar y pronosticar el clima. Algunos de estos esfuerzos han relacionado la interacción entre precipitación y temperatura, particularizando para algunas regiones, como es el caso de Pham, Leavitt, McGowan y Peres-Neto (2008) quienes sugieren que las variaciones interanuales de temperatura y precipitación en varios sistemas hídricos del Hemisferio Norte están influenciadas por las masas de aire que se originan en el Océano Pacífico, reconociendo que el cambio climático también está influenciado por cambios en las conexiones atmósfera-océano.

Parthasarathy, Kumar y Sontakke (1990), examinaron la precipitación y la temperatura monzónica de verano de la India, para obtener un predictor útil de las precipitaciones monzónicas. En el análisis se han utilizado las series de datos de precipitaciones monzónicas de verano en toda la India, y en sus subdivisiones, y de diversas temperaturas estacionales del aire en 73 observatorios de superficie y 9 estaciones de radiosondas (1951-1980). Los coeficientes de correlación (CC) entre las precipitaciones monzónicas en toda la India, y las temperaturas estacionales del aire en la superficie con diferentes retrasos, en relación con la temporada de los monzones, indican una relación sistemática.

Parthasarathy et al. (1990) estimaron la ecuación de regresión simple, desarrollada para el período 1951-1980: $y = -183,20 + 8,83x$, donde y es la precipitación monzónica en toda la India en centímetros, y x es la temperatura promedio del aire en superficie en grados Celsius, °C. Esta ecuación es significativa al nivel del 0.1%. Se ha discutido la idoneidad de este parámetro para su inclusión en un modelo de regresión predictivo junto con otros cinco parámetros globales y regionales. El análisis de regresión múltiple para la predicción a largo plazo de las lluvias monzónicas, utilizando varias combinaciones de estos parámetros, indica que la mejora de la habilidad predictiva depende considerablemente de la selección de los predictores.

El estudio de Nkuna y Odiyo (2016) realizado en la subcuenca de Levubu, South África tuvo como objetivo investigar la relación entre la temperatura y la variabilidad de las precipitaciones. En el estudio se utilizaron cuatro estaciones de lluvia ubicadas en la subcuenca de Levubu y una estación de temperatura. Se emplearon las técnicas del Procedimiento de Estandarización, análisis de correlación de Pearson y análisis de correlación cruzada. Los dos últimos métodos se utilizaron para establecer relaciones entre la precipitación y la temperatura en el área de estudio. El estudio reveló la aparición de un período extremadamente húmedo (1999/2000) y dos períodos moderadamente secos 1982/83 y 1992/93) dentro del período de estudio.

Nkuna y Odiyo identifican que los eventos húmedos fueron predominantes durante la primera mitad del período de estudio y posteriormente siguieron eventos principalmente secos. El análisis de correlación fue positivo cuando la lluvia y la temperatura se analizaron en una escala de tiempo mensual, pero negativo en una escala de tiempo anual. La precipitación anual se correlacionó con las temperaturas máximas y mínimas anuales y los resultados fueron moderadamente negativos $r < -0,5$. La precipitación mensual se correlacionó con las temperaturas máximas y mínimas mensuales y los resultados fueron positivos $r > 0,8$.

En Nkuna y Odiyo (2016) se estableció un patrón en el comportamiento de las precipitaciones y la temperatura entre sí. Durante los años fríos, se observó que las precipitaciones eran elevadas, mientras que las altas temperaturas se asociaban con precipitaciones inferiores a la media. El estudio recomienda que se deben realizar más análisis sobre las precipitaciones y la temperatura, con más conjuntos de datos antes de poder realizar futuras predicciones climáticas utilizando escalas de tiempo de alta resolución, como el análisis de datos diarios. Se encontró que los coeficientes de correlación positivos resultaban de la correlación en una escala de tiempo mensual (corta).

La investigación de Siloko y Siloko (2023) se centra en la interdependencia entre lluvia y temperatura y su efecto conjunto, reconociendo que las precipitaciones y la temperatura son variables climáticas vitales para la productividad agrícola y otras actividades humanas. A pesar de su importancia, reconocen que existen dificultades asociadas con el análisis preciso de su

distribución conjunta debido a la posibilidad de interrelación entre ellas, por lo que se investiga el análisis de las precipitaciones y la temperatura con fines exploratorios y de visualización, porque las estructuras y patrones subyacentes forman la base de las decisiones del gobierno y las agencias reguladoras.

Siloko y Siloko emplean el enfoque estadístico para investigar la interdependencia entre las precipitaciones y la temperatura en Ekpoma, Nigeria, durante un período de cinco años consecutivos de 2016 a 2020, utilizando el estimador de núcleo gaussiano. Encontrando que existe un patrón irregular de precipitaciones ocasionado por cambios de temperatura.

Otros trabajos que investigan la relación entre temperatura y precipitación son los de Zhao y Khalil (1993) para Estados Unidos; Rebetz (1996) para las regiones de Suiza; Buishand, y Brandsma (1999) para Florencia y Livorno; Dzivhani (1998) para África del Sur; Rusticucci y Penalba (2000) para América del sur; Trenberth y Shea (2005, 2010) a nivel global; Cong, y Brady (2012) para Scania, una provincia agrícola de Suecia; Pumo, Arnone y Noto (2018) para Sicilia, Italia; Islam y Zakaria (2019) para el distrito de Barishal de Bangladesh; Ukhurebor y Siloko (2020) para la Región Sur-Sur de Nigeria, y Aweda y Samson (2022) para estaciones seleccionadas en África subsahariana, iraní (Iranica).

En el caso de México, el trabajo de Tapia, Larios, Vidales, Pedraza y Víctor (2011) da cuenta sobre el efecto del posible cambio climático, analizando dos variables: temperatura y precipitación; es decir, si realmente ha habido cambios en las temperaturas registradas y si realmente han existido también, cambios significativos en la distribución y cantidad de lluvias, en la zona aguacatera de Michoacán. Ellos demuestran que la temperatura no se ha incrementado significativamente, pero el calentamiento está sucediendo en áreas urbanas y deforestadas de la cuenca atmosférica a la que pertenece la Barranca de Cupatitzio. Argumentan que la deforestación *per se* no genera un incremento en la intensidad de la lluvia, pero el calentamiento producto de la deforestación, o el calentamiento global si pueden producir un aumento en la intensidad de la lluvia, como identifican Frei, Shär, Lüthi y Davies (1998) y Labat, Godderis, Probst, y Guvot (2004).

Como se ha podido observar en el análisis previo, existen dos observaciones a tener presente. La primera es que la mayoría de los estudios se realizan a partir del análisis de correlaciones, de tipo Pearson o correlaciones cruzadas, al tiempo que se identifica escasez de estudios de la relación entre precipitación y temperatura para escenarios de México, por lo que se debe tener presente que para la determinación de la asociación estadística, como expresa Triola (2018), existen test que permiten analizar la correlación entre variables, como los de Pearson y Spearman, cuyo uso está en función de si las variables en estudio siguen una prueba paramétrica o no paramétrica. Como se sabe, ambos muestran el grado de correlación desde -1 hasta +1, donde valores próximos a la unidad indican una asociación alta y relación proporcional directa, y próximo a 0 una relación baja y no significativa, en tanto que el valor cercano a -1 una relación inversa. Hanke y Wichern (2014).

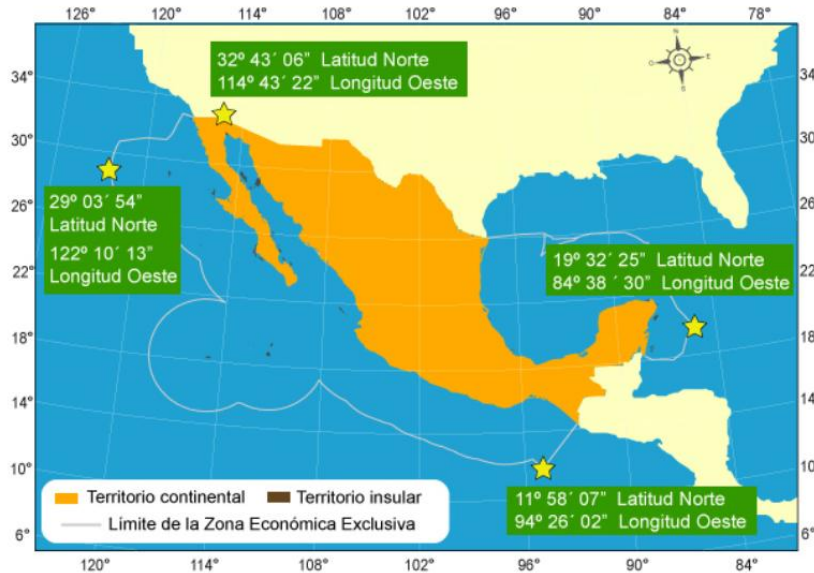
Metodología

El análisis propuesto tiene como base tres regiones geográficas: la norte, la centro y la sur, de México. Para ello se consideran los meridianos de este país. Así, los Estados Unidos Mexicanos están delimitados en el norte por el meridiano 32°43'06" latitud norte y 114°43'22" longitud oeste, situado en el estado de Baja California. Mientras que en el sur está delimitado por el estado de Chiapas, por el meridiano 11°58'07" latitud norte y 94°26'02" longitud oeste.

RELACIÓN DINÁMICA ENTRE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN PLUVIAL
EN LAS REGIONES DE MÉXICO

En el este, está delimitado por el paralelo 19°32'25" latitud norte, y 84°36'30" longitud oeste en el Estado de Quintana Roo. En el oeste por el paralelo 29°03'54" latitud norte, y 122°10'13" longitud oeste por el estado de Baja California, como se observa en el mapa 1.

Mapa 1. Límites de la República Mexicana



Fuente: INEGI, 2024a

De esa manera sea han determinado las tres regiones geográficas en los Estados Unidos Mexicanos, las cuales están delimitadas de la siguiente manera: La región norte se considera desde el meridiano 25° latitud norte hasta el meridiano 32° latitud norte; La región centro, partiendo del meridiano 18° latitud norte y terminado en 25° latitud norte, mientras que la región sur está delimitada desde el meridiano 11° latitud norte terminando en 18° latitud norte. La tabla 1 muestra las entidades federativas que se encuentran en cada región.

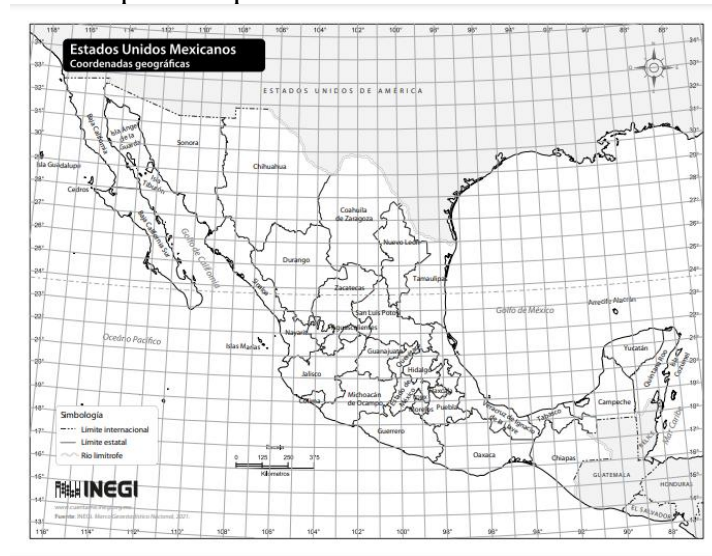
Tabla 1. Regiones geográficas de los Estados Unidos Mexicanos

Región norte		Región centro		Región sur
Baja California	Sonora	Aguascalientes	Morelos	Campeche
Baja California Sur	Tamaulipas	CDMX	Nayarit	Chiapas
Chihuahua	Zacatecas	Colima	Puebla	Guerrero
Coahuila		Estado de México	Querétaro	Oaxaca
Durango		Guanajuato	Tlaxcala	Quintana Roo
Nuevo León		Hidalgo		Tabasco
San Luis Potosí		Jalisco		Veracruz
Sinaloa		Michoacán		Yucatán

Fuente: elaboración de los autores

El mapa 2 muestra los paralelos que comprenden la delimitación geográfica propuesta, así como las entidades federativas por las que atraviesan. Cuando una entidad federativa pertenece a dos regiones, se ha asignado a aquella en la cual tiene mayor territorio.

Mapa 2. Mapa de Estados Unidos Mexicanos



Fuente: INEGI, 2024b

Respecto a la metodología a emplear en el análisis de la interacción entre precipitación pluvial y temperatura, se hace uso de la econometría de series de tiempo en la vertiente de vectores autorregresivos (VAR).

Para ello, se plantea estimar un VAR con la siguiente estructura

$$\text{Precipitación}_t = \alpha_0 + \alpha_1 \text{precipitación}_{t-1} + \alpha_2 \text{precipitación}_{t-2} + \dots + \alpha_1 \text{temperatura}_{t-1} + \alpha_2 \text{temperatura}_{t-2} + \dots + \alpha_{t,1} \quad (7)$$

$$\text{Temperatura}_t = \alpha'_0 + \alpha'_1 \text{precipitación}_{t-1} + \alpha'_2 \text{precipitación}_{t-2} + \dots + \alpha'_1 \text{temperatura}_{t-1} + \alpha'_2 \text{temperatura}_{t-2} + \dots + \alpha_{t,2} \quad (8)$$

La variable *Precipitación* representa las precipitaciones en milímetros, a nivel nacional. La variable *Temperatura* representa las temperaturas en grados Celsius, a nivel nacional durante el periodo de estudio, el cual comprende el periodo 1985-2022.

Así también se emplea la función impulso respuesta para caracterizar el efecto que tiene un shock de una desviación estándar en la innovación, sobre las variables contemporáneas del VAR, e identificar si este es permanente, transitorio o nulo.

Resultados

Con datos de precipitación pluvial en milímetros y temperatura en grados Celsius, por entidad federativa, se ha estimado el VAR que se presenta en la tabla 2, así como los estadísticos habituales. La variable *Precip* representa las precipitaciones a nivel nacional. La variable *Temp* representa las temperaturas a nivel nacional durante el periodo de estudio. El VAR estimado para cada región satisface la condición de estabilidad, lo que garantiza la validez de los errores estándar de la función impulso-respuesta, como se puede apreciar en el Anexo A-1. Así mismo, se ha utilizado el criterio de Schwarz para determinar el rezago óptimo, el cual es de uno para la estimación, dado que este garantiza que las innovaciones sean ruido blanco, este criterio coincide, en las regiones centro y sur, con el Estadístico de prueba LR modificado secuencial, con el criterio de error de predicción final, con el de Akaike y con el de Hannan-Quinn, como se observa en el anexo A-2. Así también

RELACIÓN DINÁMICA ENTRE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN PLUVIAL
EN LAS REGIONES DE MÉXICO

se han validado los supuestos de no correlación serial, distribución normal con ortogonalización de Cholezky y homoscedasticidad multivariantes, en las innovaciones del VAR, como se observa en los anexos A-3, A-4 y A-5, respectivamente.

Tabla 2. Estimación del vector autorregresivo.

Periodo muestral (ajustado): 1986 2022									
Numero de observaciones: 37 después de ajustes									
Desviación estándar en (), estadístico t en []									
Parámetro	Región norte			Región centro			Región sur		
	Variable	Precip _t	Temp _t		Precip _t	Temp _t		Precip _t	Temp _t
\square_1	Precip _{t-1}	0.211 (0.170) [1.23]	0.001 (0.0007) [2.089]	Precip _{t-1}	0.185 (0.164) [1.133]	0.0007 (0.0005) [1.5130]	Precip _{t-1}	-0.068 (0.168) [-0.409]	0.0001 (0.0003) [0.5018]
\square_1	Temp _{t-1}	3.652 (18.050) [0.202]	0.883 (0.078) [11.206]	Temp _{t-1}	71.111 (31.655) [2.246]	0.786 (0.098) [7.954]	Temp _{t-1}	50.765 (48.799) [1.040]	0.751 (0.109) [6.838]
\square_0	Intercepto	323.725 (398.246) [0.812]	1.706 (1.738) [0.981]	Intercepto	-663.486 (560.472) [-1.183]	3.467 (1.751) [1.980]	Intercepto	316.233 (1248.77) [0.253]	6.0060 (2.813) [2.134]
\square_t	Innovación	$\square_{t,1}$	$\square_{t,2}$	Innovación	$\square_{t,1}$	$\square_{t,2}$	Innovación	$\square_{t,1}$	$\square_{t,2}$
	Suma de los cuadrados de los residuales	242995.0	4.630		373799	3.649		916949.7	4.654
	Error estándar de la ecuación	84.539	0.369		104.852	0.327		164.222	0.370
	F-statistic	0.768	62.997		5.270	46.897		0.611	23.644
	Log likelihood	-215.113	-14.053		-223.081	-9.648		-239.681	-14.150
	Akaike AIC	11.789	0.921		12.220	0.683		13.117	0.927
	Schwarz SC	11.920	1.052		12.351	0.814		13.248	1.057
	Mean dependent	507.832	20.956		859.462	19.218		1494.224	25.259
	S.D. dependent	83.994	0.778		116.628	0.617		162.440	0.556
	Log likelihood		-224.894			-232.592			-253.368
	Criterio de información de Akaike		12.480			12.896			14.019
	Criterio de información de Schwarz		12.742			13.158			14.281

Fuente: Elaboración de los autores con datos de CONAGUA 2024a, 2024b

Para analizar la respuesta al impulso de una desviación estándar en las innovaciones, se presentan los resultados en la tabla 3 para las tres regiones del país. Como se puede observar en el texto en negrilla, para la región norte, un shock en $\square_{t,1}$ aumenta la precipitación promedio en el primer año hasta en 84.5 milímetros y hasta en 17.2 mm. en el segundo año, siendo un efecto transitorio, en tanto que no muestra efectos sobre la temperatura. Un shock en $\square_{t,2}$ reduce la precipitación en 0.16 mm. en promedio regional, en tanto que aumenta la temperatura en el primer año en hasta 0.320 grados, en el segundo en hasta 0.290, en el tercero en hasta 0.250, en el cuarto

en hasta 0.230, en el quinto en hasta 0.200, en el sexto en hasta 0.180 y en el séptimo en hasta 0.160 grados promedio, lo que indica un efecto persistente que se diluye con el paso del tiempo.

Para la región centro, un shock en $\square_{t,1}$, reporta un aumento de hasta 104.8 mm. al siguiente año en promedio regional, en tanto que la temperatura no se ve alterada significativamente en el primer año, pero aumenta hasta 23.210 grados Celsius en el segundo año, hasta 22.280 en el tercer año y hasta 19.850 en el cuarto año en promedio. Un shock en $\square_{t,2}$, no reporta efecto en la precipitación, pero si en la temperatura, aumentándola en promedio hasta 0.320 grados centígrados en el primer año, hasta 0.250 en el segundo, hasta 0.220 en el tercero, hasta 0.190 en el cuarto, hasta 0.160 en el quinto, y hasta 0.140 en el sexto, es decir, se observa un efecto persistente que se diluye con el paso del tiempo.

Para la región sur, un shock en $\square_{t,1}$, reporta un aumento promedio regional de hasta 164.22 mm. de precipitación al año siguiente, no observándose efecto sobre la temperatura. Un shock en $\square_{t,2}$, no tiene efecto significativo en la precipitación promedio de la región, sin embargo, se observa un efecto persistente en la temperatura para los siguientes cuatro años: de hasta 0.360 grados centígrados en el primer año, de hasta 0.270 en el segundo año, de hasta 0.210 en el tercer año y de hasta 0.160 en el cuarto año.

Tabla 3. Respuesta al impulso ante un shock de una desviación estándar en las innovaciones.

Región norte			Región centro			Región sur		
Respuesta de Precip			Respuesta de Precip			Respuesta de Precip		
Periodo	Precip	Temp	Periodo	Precip	Temp	Periodo	Precip	Temp
1	84.53*	0.00	1	104.85*	0.00	1	164.22*	0.00
	(9.82)	(0.00)		(12.18)	(0.00)		(19.09)	(0.00)
2	17.27*	1.20	2	17.50	23.21*	2	-14.27	18.54
	(14.50)	(5.93)		(18.14)	(10.67)		(28.11)	(17.96)
3	3.59	1.31	3	7.47	22.58*	3	0.34	12.66
	(5.87)	(6.48)		(7.55)	(9.54)		(6.11)	(12.41)
4	0.80	1.22	4	5.67	19.85*	4	-0.63	9.79
	(1.86)	(6.02)		(6.07)	(9.27)		(2.56)	(9.76)
5	0.23	1.09	5	4.83	17.25	5	-0.41	7.46
	(0.71)	(5.43)		(5.38)	(9.13)		(1.99)	(7.77)
6	0.10	0.98	6	4.18	14.97	6	-0.32	5.70
	(0.49)	(4.86)		(4.80)	(8.99)		(1.51)	(6.28)
7	0.07	0.87	7	3.63	12.99	7	-0.24	4.35
	(0.43)	(4.34)		(4.31)	(8.81)		(1.15)	(5.12)
8	0.06	0.78	8	3.15	11.27	8	-0.18	3.32
	(0.38)	(3.88)		(3.87)	(8.56)		(0.88)	(4.19)
9	0.05	0.69	9	2.7	9.78	9	-0.14	2.53
	(0.34)	(3.47)		(3.50)	(8.26)		(0.67)	(3.45)
10	0.049	0.61	10	2.37	8.48	10	-0.10	1.93
	(0.30)	(3.10)		(3.16)	(7.90)		(0.51)	(2.83)
Respuesta de Temp			Respuesta de Temp			Respuesta de Temp		
Periodo	Precip	Temp	Periodo	Precip	Temp	Periodo	Precip	Temp
1	-0.16	0.32*	1	-0.02	0.32*	1	-0.05	0.36*
	(0.05)	(0.03)		(0.05)	(0.03)		(0.06)	(0.04)
2	-0.01	0.29*	2	0.05	0.25*	2	-0.01	0.27*
	(0.07)	(0.04)		(0.06)	(0.04)		(0.07)	(0.05)
3	0.01	0.25*	3	0.06	0.22*	3	-0.01	0.21*

RELACIÓN DINÁMICA ENTRE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN PLUVIAL
EN LAS REGIONES DE MÉXICO

	(0.07)	(0.05)		(0.06)	(0.05)		(0.05)	(0.06)
4	0.01	0.23*	4	0.05	0.19*	4	-0.009	0.16*
	(0.06)	(0.06)		(0.05)	(0.06)		(0.04)	(0.07)
5	0.01	0.20*	5	0.04	0.16*	5	-0.006	0.12
	(0.06)	(0.06)		(0.04)	(0.06)		(0.03)	(0.07)
6	0.01	0.18*	6	0.04	0.14*	6	-0.005	0.09
	(0.05)	(0.07)		(0.04)	(0.07)		(0.02)	(0.06)
7	0.01	0.16*	7	0.03	0.12	7	-0.004	0.07
	(0.04)	(0.07)		(0.03)	(0.07)		(0.01)	(0.06)
8	0.01	0.14	8	0.03	0.10	8	-0.003	0.05
	(0.04)	(0.08)		(0.03)	(0.07)		(0.01)	(0.05)
9	0.01	0.12	9	0.02	0.093	9	-0.002	0.04
	(0.03)	(0.08)		(0.03)	(0.07)		(0.01)	(0.04)
10	0.009	0.11	10	0.02	0.08	10	-0.001	0.03
	(0.03)	(0.08)		(0.02)	(0.07)		(0.008)	(0.04)
Cholesky Ordering: Precip Temp								
Standard Errors: Analytic								

Fuente: Elaboración de los autores con datos de CONAGUA 2024a, 2024b

Nota: * Significativo al 5%.

Conclusiones

El cambio climático es un fenómeno que merece ser estudiado para entender su dinámica y establecer acciones que redunden en su mitigación o en la resiliencia del ser humano. Pronosticar su comportamiento y la construcción de escenarios redundan en ello. Analizar la interacción entre las precipitaciones pluviales y la temperatura contribuye al entendimiento del cambio climático. La econometría de series de tiempo permite el análisis de las interacciones entre estas variables a través de la endogenización de ellas mediante la propuesta de vectores autorregresivos y, mediante la función impulso respuesta, el efecto que causa un shock a las innovaciones. Con su uso, se ha identificado la existencia de efectos transitorios, permanentes y nulos entre ambas variables. En el caso de la región norte, un shock en $\square_{t,1}$ aumenta la precipitación promedio observándose un efecto transitorio, y efectos nulos sobre la temperatura. Un shock en $\square_{t,2}$ genera un efecto persistente que se diluye con el paso del tiempo.

Para la región centro, un shock en $\square_{t,1}$, reporta un efecto transitorio sobre la precipitación, en tanto que la temperatura muestra un efecto persistente. Un shock en $\square_{t,2}$, tiene un efecto nulo en la precipitación, pero un efecto persistente en la temperatura, que se diluye con el paso del tiempo. Para la región sur, un shock en $\square_{t,1}$, reporta un efecto transitorio en la precipitación, pero nulo sobre la temperatura. Un shock en $\square_{t,2}$, no tiene efecto significativo en la precipitación promedio de la región, sin embargo, se observa un efecto persistente en la temperatura. Así, la función impulso respuesta ha permitido caracterizar el alcance y magnitud de shock en las innovaciones, lo que abre la posibilidad de predecir el comportamiento de la temperatura y la precipitación pluvial en las regiones de México.

Respecto al análisis para el desarrollo regional, el estudio muestra que, el efecto de los shocks, en la temperatura, tienden a ser persistentes en las tres regiones consideradas, destacando la región centro, al mostrar que tanto en la precipitación como en la temperatura los efectos son de más largo alcance temporal. Así mismo, un shock en la innovación de la precipitación, $\square_{t,1}$, tiene únicamente un efecto de corto plazo para las tres regiones. A la luz de estos hallazgos se puede expresar que la temperatura es la variable climática, de las dos consideradas, que más influencia

tiene en México, si se considera que un shock en su innovación tiene un alcance de horizonte temporal de largo plazo. Ante esto, es importante el establecimiento de estrategias que mitiguen los efectos del cambio climático, como la desertificación, dado que su incidencia puede afectar aspectos como la producción agropecuaria, los ecosistemas, las migraciones por escases de agua, etcétera, sobre todo, en la región centro, que es la muestra efectos de largo plazo ante shocks climáticos, no olvidando las otras dos regiones.

Referencias literarias

- Aweda, F. and Samson, T.** (2022). ‘Relationship between Air Temperature and Rainfall Variability of Selected Stations in SubSahara Africa, Iranian (Iranica)’ *Journal of Energy & Environment*, 13(3), pp. 248-257. Available at: Doi:10.5829/ijee.2022.13.03.05.
- Aguntin, Domingo.** (2015). ‘Apuntes de los temas de termodinámica’. Available at: https://oa.upm.es/38735/1/amd-apuntes-termodinamica-v3_0.pdf.
- Benzi, R, Deidda, R and Marrocu, M.** (1997), ‘Characterization of Temperature and Precipitation fields’. *International Journal of Climatology*. 17, pp. 1231-1262.
- Buishand, T. A and Brandsma, T.,** (1999). ‘Dependence of precipitation on temperature at Florence and Livorno (Italy)’. *Climate Research*, 12, pp. 53–63.
- CONAGUA** (2024a). ‘Precipitación promedio. Comportamiento de la lluvia promedio mensual a nivel estatal y nacional desde 1985 a la fecha medida a través de estaciones convencionales y automáticas’. Available at: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/precipitacion>. Fecha de consulta: 26 de junio de 2024.
- CONAGUA** (2024b). ‘Temperatura promedio. Comportamiento de la temperatura promedio a nivel mensual estatal y nacional desde 1985 a la fecha medida a través de estaciones convencionales y automáticas’. En: <https://www.datos.gob.mx/busca/dataset/temperatura-promedio-excel>. Fecha de consulta: 26 de junio de 2024.
- Cong, R.-G. and Brady, M.** (2012). ‘The interdependence between rainfall and temperature: copula analyses’, *The Scientific World Journal*, 2012. Available at: Doi:10.1100/2012/405675.
- Dzivhani, M.A,** (1998). ‘Temperature and rainfall variability over the Northern Region of Limpopo Province for the past 35 years’. Honours dissertation for BA degree in Geography. University of Venda, South Africa.
- Frei, C.; Shär, C., Lüthi, D. and Davies, H. C.** (1998). ‘Heavy precipitation processes in a warmer climate’. *Geophysical Research Letters*. 25(9), pp. 1431-1434.
- Fundación Aquae.** (2020). ‘El ciclo del agua, un viaje con retorno – hidrosfera’. *Fundacionaquae.org*. Available at: https://www.fundacionaquae.org/wiki-explora/07_cicloagua/index.html.
- Hanke, J., and Wichern, D.** (2014). ‘Business forecasting’ (9th ed.). *Pearson*. Available at: <https://www.amazon.com/-/es/JohnHanke/dp/0132301202>.
- IHS Global** (2016). ‘EViews 9 User’s Guide II. Chapter 39. Vector autoregression and error correction models’. EViews (version 9.0) Available at: www.eviews.com.

- INEGI** (2024a). *Coordenadas extremas*. México: INEGI. Disponible en: <https://cuentame.inegi.org.mx/territorio/coordenadas.aspx?tema=T>. Consultado el 19 de junio de 2024.
- INEGI** (2024b). *Mapa de Estados Unidos Mexicanos*. México: INEGI. Disponible en <https://cuentame.inegi.org.mx/mapas/pdf/nacional/coordenadas/coord-byn-n.pdf>. Consultado el 19 de junio de 2024.
- Intergovernmental Panel on Climate Change** (2007). (IPCC). *IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis*. En: https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch3s3-3-5.html Fecha de consulta: 28 de junio de 2024.
- Islam, M. T. and Zakaria, M.** (2019). 'Interdependency between rainfall and temperature using correlation analysis in the Barishal district of Bangladesh', *IOSR Journal of Applied Mathematics*, 15(5), pp. 49-55. Available at: Doi:10.9790/5728-1505034955.
- Labat, D.; Godderis, Y., Probst, J. L. and Guvot, J. L.** (2004). 'Evidence for global runoff increase related to climate warming'. *Advances in Water Resources*. 27(6), pp.631-642.
- Nkuna Tinyiko R. and Odiyo John O.** (2016). *The relationship between temperature and rainfall variability in the Levubu sub-catchment*, South Africa: International Journal of Education and Learning. Available at: <http://iaras.org/iaras/journals/ijes>.
- Parthasarathy, B., Rupa Kumar, K. and Sontakke, N.A.** (1990). 'Surface and upper air temperatures over India in relation to monsoon rainfall'. *Theor Appl Climatol* 42, pp. 93–110. Available at: <https://doi.org/10.1007/BF00868216>.
- Pham, S. V., P. R. Leavitt, S. McGowan and P. Peres-Neto** (2008). 'Spatial variability of climate and land-use effects on lakes of the northern Great Plains'. *Limnology and Oceanography* 53, pp. 728-742.
- Polanco, A.** (2017). 'Temperatura: definición, medición y escalas - Naturaleza y ecología'. *Naturaleza y Ecología*. Disponible en: <https://naturaleza.animalesbiologia.com/atmosfera/temperatura-definicion-medicion-escalas>.
- Pumo, D., Carlino, G., Arnone, E. and Noto, L. V.** (2018). 'Relationship between extreme rainfall and surface temperature in Sicily (Italy)', *EPIc Series in Engineering*, 3, pp. 1718-1726. Available at: Doi:10.29007/rfts.
- Rebetz, M.** (1996). 'Seasonal Relationships between temperature, precipitation and snow cover in a mountainous region', *Springer-Verlag, Austria*.
- Romero Aguilar, Randall** (2022). *Apuntes de macroeconomía*. On line. Disponible en: <https://randall-romero.github.io/econometria/00-acerca.html>. Fecha de consulta: 30 de mayo de 2024.
- Rusticucci, M., and O. Penalba,** (2000). 'Precipitation seasonal cycle over southern South America'. *Clim. Res.*, 16, 1–15.
- Siloko I. U. and Siloko, E. A.** (2023). 'An Investigation on Interdependence Between Rainfall and Temperature in Ekpoma, Edo State, Nigeria'. *Iranian (Iranica) Journal of Energy and Environment* 14(3), pp. 197-204.

- Tapia Vargas Luis Mario, Larios Guzmán Antonio, Vidales Fernández Ignacio, Pedraza Santos Martha Elena and Víctor Barradas Luis** (2011). ‘Cambio climático en la zona aguacatera de Michoacán: análisis de precipitación y temperatura a largo plazo’, *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 2(1) de septiembre - 31 de octubre, 325-335.
- Trenberth, K.E and Shea, D.J**, (2010). ‘Relationships between precipitation and surface temperature’, *Geophysical Research Letters*, Vol. 32, National Centre for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA, pp 54.
- Trenberth, K.E., and D.J. Shea**, 2005: ‘Relationships between precipitation and surface temperature. Geophys’. Res. Lett., 32, L14703, Available at: doi:10.1029/2005GL022760.
- Triola, M.** (2018). *Elementary Statistics* (13th ed.). Pearson. Disponible en: <https://www.pearson.com/store/p/elementarystatistics/P100002509154>.
- Ukhurebor, K. E. and Siloko, I. U.** (2020). ‘Temperature and rainfall variability studies within South-South region of Nigeria’, *AU eJournal of Interdisciplinary Research*, 5(2), pp. 1-19. Available at: <http://www.assumptionjournal.au.edu/index.php/eJIR/article/view/4791>.

RELACIÓN DINÁMICA ENTRE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN PLUVIAL
EN LAS REGIONES DE MÉXICO

Anexos

Anexo A-1. Condición de estabilidad para el VAR de cada una de las regiones de México

Raíces del polinomio característico					
Variables endógenas: Precip Temp					
Variables exógenas: C					
Especificación de retraso: 1 1					
Región norte		Región centro		Región sur	
Raíz	Modulus	Raíz	Modulus	Raíz	Modulus
0.891373	0.89	0.86	0.86	0.76	0.76
0.203240	0.20	0.10	0.10	-0.08	0.08
Ninguna raíz se encuentra fuera del círculo unitario.					
VAR satisface la condición de estabilidad.					

Fuente: Elaboración de los autores con datos de CONAGUA 2024a, 2024b

Anexo A-2. Criterios para la selección del rezago óptimo.

Criterios de selección de orden de retraso VAR						
Variables endógenas: Precip Temp						
Variables exógenas: C						
Muestra: 1985 2022						
Observaciones incluidas: 35						
Región norte						
Lag	LogL	LR	FPE	AIC	SC	HQ
0	-243.81	NA	4320.25	14.04	14.13	14.07
1	-211.32	59.41*	848.79	12.41	12.68*	12.51*
2	-207.50	6.54	860.22	12.42	12.87	12.58
3	-202.23	8.43	805.64*	12.35*	12.97	12.57
Región centro						
Lag	LogL	LR	FPE	AIC	SC	HQ
0	-244.44	NA	4478.35	14.08	14.17	14.11
1	-220.83	43.18*	1460.99*	12.96*	13.22*	13.05*
2	-219.34	2.54	1692.25	13.10	13.55	13.25
3	-214.97	6.99	1668.36	13.08	13.70	13.29
Región sur						
Lag	LogL	LR	FPE	AIC	SC	HQ
0	-253.6114	NA	7560.14	14.60	14.69	14.63
1	-238.3611	27.88*	3978.19*	13.96*	14.23*	14.05*
2	-236.0869	3.89	4404.08	14.06	14.50	14.21
3	-235.0017	1.73	5238.77	14.22	14.85	14.44
* indica el orden de retraso seleccionado por el criterio						
LR: Estadístico de prueba LR modificado secuencial (cada prueba al nivel del 5%)						
FPE: Error de predicción final						
AIC: Criterio de información de Akaike						
SC: Criterio de información de Schwarz						
HQ: Criterio de información de Hannan-Quinn						

Fuente: Elaboración de los autores con datos de CONAGUA 2024a, 2024b

Anexo A-3. No correlación serial del VAR. LM test

Hipótesis nula: no hay correlación serial en el orden de retraso h		
Muestra: 1985 2022		
Observaciones incluidas: 37		
Región norte		
Rezagos	LM-Stat	Prob
1	6.97	0.13
2	7.12	0.12
Región centro		
Rezagos	LM-Stat	Prob
1	3.00	0.55
2	1.45	0.83
Región sur		
Rezagos	LM-Stat	Prob
1	3.93	0.41
2	0.95	0.91
Probs. de chi-cuadrado con 4 gl.		

Fuente: Elaboración de los autores con datos de CONAGUA 2024a, 2024b

Anexo A-4. Test de normalidad multivariante del VAR

Ortogonalización: Cholesky (Lutkepohl)			
Hipótesis nula: los residuos son normales multivariados			
Muestra: 1985 2022			
Observaciones incluidas: 37			
Región norte			
Componente	Jarque-Bera	G. de L.	Prob.
1	1.37	2	0.50
2	0.01	2	0.99
Conjunto	1.38	4	0.84
Región centro			
1	1.64	2	0.44
2	0.10	2	0.94
Conjunto	1.74	4	0.78
Región sur			
1	1.43	2	0.48
2	0.32	2	0.84
Conjunto	1.76	4	0.77

Fuente: Elaboración de los autores con datos de CONAGUA 2024a, 2024b

RELACIÓN DINÁMICA ENTRE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN PLUVIAL
EN LAS REGIONES DE MÉXICO

Anexo A-5. Test de homoscedasticidad multivariante del VAR, con términos cruzados.

Muestra: 1985 2022					
Observaciones incluidas: 37					
Región norte					
test conjunto:					
Chi-sq	G. de L.	Prob.			
12.91255	15	0.6091			
Componentes individuales:					
Dependiente	Coef. de determinación	F(5,31)	Prob.	Chi-sq(5)	Prob.
res1*res1	0.06	0.42	0.82	2.37	0.79
res2*res2	0.07	0.53	0.74	2.95	0.70
res2*res1	0.16	1.25	0.30	6.21	0.28
Región centro					
test conjunto:					
Chi-sq	G. de L.	Prob.			
16.55503	15	0.3462			
Componentes individuales:					
Dependiente	Coef. de determinación	F(5,31)	Prob.	Chi-sq(5)	Prob.
res1*res1	0.03	0.21	0.95	1.26	0.93
res2*res2	0.15	1.10	0.37	5.59	0.34
res2*res1	0.15	1.14	0.35	5.75	0.33
Región sur					
test conjunto:					
Chi-sq	G. de L.	Prob.			
21.09064	15	0.1340			
Componentes individuales:					
Dependiente	Coef. de determinación	F(5,31)	Prob.	Chi-sq(5)	Prob.
res1*res1	0.11	0.81	0.54	4.30	0.50
res2*res2	0.33	3.12	0.02	12.38	0.02
res2*res1	0.062	0.41	0.83	2.29	0.80

Fuente: Elaboración de los autores con datos de CONAGUA 2024a, 2024b

