Evaluación de la precipitación y temperatura simuladas por el modelo WRF en el estado de Chihuahua

Arturo Corrales-Suastegui^{1*}, Luis Antonio González-Jasso¹, Noe Chávez-Sánchez² y Priscila Gabriela Contreras-García³

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Campo Experimental Pabellón. Carretera Aguascalientes-Zacatecas km 32.5, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México. C.P. 20670, corrales.arturo@inifap.gob.mx; gonzalez.luis@inifap.gob.mx

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Campo Experimental Delicias. Kilómetro 2 Carretera Delicias-Rosales, Centro, Cd. Delicias, Chihuahua, Mexico. C.P. 33000, chavez.noe@inifap.gob.mx

³Secretaría de Desarrollo Rural. Avenida División del Norte #2504, Colonia Altavista, Chihuahua, Chih.,

priscila.contreras@chihuahua.gob.mx

*Autor de correspondencia: corrales.arturo@inifap.gob.mx

Resumen

En este trabajo se evaluó el modelo de investigación y pronóstico del tiempo (WRF, por su siglas en inglés) con datos del reanálisis ERA5 para las variables de precipitación, temperatura mínima, máxima y promedio para un periodo de 74 días (20 de junio - 4 de septiembre de 2024). Para lo anterior, se construyeron series de tiempo para el mismo periodo a partir de las primeras 24 h de simulación, así como a partir de las 48 h de simulación. Los resultados indican que el WRF reproduce los patrones espaciales de precipitación y temperatura de forma cercana a ERA5, así como la variabilidad diaria en estas variables. El WRF presentó un sesgo húmedo hacia regiones altas del estado y seco hacia el norte y noreste, con relación a la temperatura, se encontró un sesgo cálido en el modelo hacia el oeste y suroeste del estado y frío para las regiones de menor elevación. Se encontró una alta correlación entre las variables simuladas y observadas con valores de 0.83 para precipitación y 0.86 para temperatura promedio. A partir de un ajuste lineal, se encontró un R² de ~84% para precipitación y para el caso de temperatura promedio, el modelo explicó más del 80% de la varianza en las observaciones. Los resultados sugieren que esta implementación del WRF simula de manera consistente las variables evaluadas, lo cual es de suma importancia para generar, a partir de estas, otras variables derivadas como heladas, índices de estrés calórico, aplicaciones de riego, entre otras, las cuales tienen una amplia aplicación en el sector agropecuario, forestal y social del estado de Chihuahua y que podrían implementarse en otras regiones y estados del país.

Palabras clave— México, Reanálisis, Sector primario, Simulación numérica del tiempo, WRF-ARW

Evaluation of Precipitation and Temperature Simulated by the WRF Model in the State of Chihuahua

Abstract

In this work, we evaluated the Weather Research and Forecasting model (WRF) with data from the ERA5 reanalysis for precipitation variables, minimum, maximum, and average temperature for 74 days (June 20 - September 4, 2024). For this purpose, we constructed a time series for the same period from the first 24 hours of simulation and from the 48 hours of simulation. The results indicate that the WRF reproduces the spatial patterns of precipitation and temperature closely to ERA5 and the daily variability in these variables. The WRF presented a wet bias towards high regions of the state and dry towards the north and northeast. Regarding temperature, we found a warm bias in the model towards the west and southwest of the state and cold for the lower elevation regions. We found a high correlation between the simulated and observed variables, with values of 0.83 for precipitation and 0.86 for average temperature. We found an R2 of ~84% for precipitation from a linear fit, and for the average temperature case, the model explained more than 80% of the variance in the observations. The results suggest that this implementation of the WRF consistently simulates the evaluated variables, which is of utmost importance to generate, from these, other derived variables such as frost, heat stress indices, and irrigation applications, among others, which have a wide application in the agricultural, forestry and social sectors of the state of Chihuahua and that could be implemented in other regions and states of the country.

Keywords— Mexico, Reanalysis, Primary sector, Numerical weather prediction, WRF-ARW

Introducción

I.

La vulnerabilidad de México a los riesgos hidrometeorológicos, como huracanes, inundaciones, sequías, heladas, granizo y lluvias intensas, es evidente [1]. Los impactos recurrentes de estos eventos han tenido consecuencias negativas en el medio ambiente, la economía y la sociedad en todo el país [1]. Aunque la contribución de la agricultura al PIB ha disminuido en los últimos años debido a la sequía y las inundaciones impredecibles, este sector sigue siendo fundamental para la generación de empleos y los medios de vida en México.

La extrema vulnerabilidad del sector agrícola a estos riesgos ha llevado a concentrar esfuerzos en la gestión de pronósticos meteorológicos. En 2024, el INIFAP, en colaboración con la Secretaría de Agricultura del estado de Chihuahua, implementó el modelo de investigación y pronóstico del tiempo (WRF, por sus siglas en inglés) para apoyar la demanda de pronósticos meteorológicos en las regiones agrícolas, pecuarias y forestales de Chihuahua, mitigando así los impactos de estos eventos.

El uso de modelos de simulación numérica del tiempo, como WRF, es una herramienta tecnológica complementaria a las observaciones convencionales. Su mayor resolución espacial y temporal permite a los meteorólogos analizar con mayor detalle la evolución de los fenómenos meteorológicos y proporciona un marco detallado para interpretar las observaciones reales [2]. Uno de los primeros trabajos en los que se utilizó un modelo de simulación numérica del tiempo en México fue [3], en el cual los autores, mediante el modelo de mesoescala versión 5 (MM5, por sus siglas en inglés) investigaron los campos simulados de precipitación sobre el país; dónde, a partir de los resultados obtenidos identificaron el potencial de tal esquema de diagnóstico y pronóstico.

Actualmente, instituciones de Estados Unidos y Europa utilizan el sistema WRF principalmente para protegerse contra desastres naturales. En México, la CONAGUA y la Universidad de Guadalajara también han implementado este sistema [4], reconociendo sus ventajas y beneficios para el pronóstico meteorológico. Este trabajo tuvo como objetivo evaluar la implementación operativa del modelo WRF en el estado de Chihuahua, realizada en 2024 como parte de una iniciativa conjunta entre el Gobierno estatal y el INIFAP. La meta es generar información meteorológica confiable, integrando observaciones y modelos como WRF, para apoyar los sectores agrícola, forestal y pecuario.

II. MÉTODOS

A. Área de estudio

El estado de Chihuahua se localiza al norte de México, como se muestra en la Fig. 1, es el mayor estado en extensión territorial de México, con una extensión de 247,412 km², que corresponde al 12.6% del país; al norte tiene la mayor línea fronteriza con Estados Unidos de Norteamérica, colinda con los estados de Nuevo México y Texas, en nuestro territorio colinda al oeste con Sonora, al sur con Durango y Sinaloa y al este con Coahuila.

En Chihuahua se presentan diversos contrastes climáticos, con regiones que alcanzan temperaturas de 45 °C en el verano en las regiones desérticas y en el invierno existen regiones con mínimas de -23.0 °C en la Sierra Madre Occidental. En el 40% del territorio estatal existe clima cálido y muy cálido seco, en las llanuras del norte y noreste del estado; la partes bajas de la Sierra Madre Occidental representan el 33% de la superficie estatal con clima templado y cálido semiseco con lluvias en verano; las sierras y partes altas ocupan el 24% del territorio, con clima semifrío subhúmedo, con lluvias en verano e invierno y otras zonas con clima templado subhúmedo; la temperatura media anual en el estado es de 17.0°C, las lluvias son escasas y se presentan durante el verano, la precipitación anual varía de 240 a 780 mm, con un promedio anual de 510 mm [5].

B. Datos

Se utilizaron datos de precipitación y temperatura a partir del reanálisis ERA5 Land (ERA5, en adelante) [6] para el periodo que comprende del 20 de junio al 4 de septiembre de 2024, dando un total de 74 días.



Fig. 1. Izquierda: México y la región de estudio resaltada en gris sólido. Derecha: Estado de Chihuahua y su topografía (m). La flecha indica el norte.

C. Modelo

El sistema de modelado WRF es resultado de un esfuerzo de múltiples agencias para proporcionar un sistema de modelo de pronóstico de mesoescala que tiene como objetivo el avance tanto de la comprensión y simulación del tiempo meteorológico, así como acelerar la transferencia de los avances de la investigación hacia la parte operativa. El modelo fue desarrollado por el National Centers for Environmental Prediction (NOAA/NCEP), NOAA Earth Systems Research Laboratory Global Systems Division (NOAA/ESRL/GSD), National Center for Atmospheric Research (NCAR), Mesoscale Microscale Meteorology Division (MMM), Department of Defense's Air Force Weather Agency (AFWA) y la Federal Aviation Administration (FAA) [7]. El WRF ha sido ampliamente utilizado en simulaciones climáticas regionales, en interacción tierra-atmósfera y para simulación hidrológica [8, 9]. En esta implementación del WRF (versión 4.5.2) se utiliza el núcleo dinámico Advanced Research WRF (ARW), el cual es desarrollado principalmente por el NCAR. Es un subconjunto del sistema de modelado WRF que, además del núcleo, abarca esquemas para la física, opciones numéricas y dinámicas, rutinas de inicialización y un paquete de asimilación de datos [10].

El modelo se integra diariamente durante 174 h de simulación. Se ejecuta en un dominio computacional que cubre completamente a México (d01) con paso de malla horizontal de 12 km y un dominio anidado (d02) de alta resolución espacial (3 km) que cubre completamente al estado de Chihuahua, como se muestra en la Fig. 2. Las condiciones iniciales y de frontera se obtienen a partir de las 0000 UTC del Global Forecast System (GFS). El dominio d02 se inicializa junto con d01 y se ejecuta durante 54 h de simulación. Las primeras 6 h se consideran spin-up del modelo y se descartan para ambos dominios. La configuración del modelo se muestra en la Tabla 1.

Con base en el pronóstico diario se construyeron dos series de tiempo utilizando las 24 y 48 h de simulación para el periodo del 20 de junio al 4 de septiembre de 2024, como se muestra en la Tabla 2.



Fig. 2. Dominio computacional del WRF (d01). Dominio anidado que cubre completamente al estado de Chihuahua (d02).

	d01	d02		
Longitud de la simulación	174 horas	54 horas		
Espaciado de malla	12 km	03 km		
Niveles verticales	40	40		
Frecuencia de actualización de las condiciones de frontera	03 horas	03 horas		
Dinámica	No hidrostático	No hidrostático		
Esquema de cumulus	Betts-Miller-Janjic	No esquema de cumulus		
Esquema de microfísica	NSSL 1	NSSL 1		
Esquema de PBL	Mellor-Yamada- Janjic	Mellor-Yamada-Janjic		
Esquema de superficie terrestre	Noah 4-Layer LSM	Noah 4-Layer LSM		
Física de la capa superficial	Monin-Obukhov (Janjic)	Monin-Obukhov (Janjic)		
Radiación de onda larga	RRTM	RRTM		
Radiación de onda corta	Esquema de Dudhia	Esquema de Dudhia		

FABLA 2. Esquema	de tiempo del	pronóstico	para d02.
------------------	---------------	------------	-----------

Junio 2024	19	20	21	22	23	24	25	
Pronóstico	24h	48h						
		24h	48h					
			24h	48h				
				24h	48h			
					24h	48h		
						24h	48h	

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados de la evaluación del modelo WRF para el periodo que comprende del 20 de junio al 4 de septiembre de 2024. Aun cuando es un periodo corto de evaluación cabe destacar que se realizó durante la estación húmeda, destacando que gran parte de Chihuahua está dentro de la región del Monzón de Norteamérica. De manera general, encontramos que el WRF reproduce cercano a las observaciones los patrones espaciales y temporales de la precipitación y temperatura, dos variables de suma importancia para aplicaciones agrícolas, forestales y pecuarias.

A. Precipitación

En la Fig. 3 se muestra la precipitación acumulada durante el periodo de estudio a partir de ERA5 y de WRF para el mismo periodo a partir de las simulaciones de 24h y 48h, ver Tabla 2. En la Fig. 3a, la precipitación a partir de ERA5 muestra un patrón espacial muy marcado, con precipitaciones máximas (> 400 mm) hacia el suroeste, siendo estas regiones las más altas que corresponden a la Sierra Madre Occidental, estas regiones se encuentran dentro de la influencia del Monzón de Norteamérica, el cual se caracteriza por precipitaciones máximas durante julio, agosto y septiembre [11]. Las precipitaciones mínimas se dan hacia el norte, noreste, sureste y centro del estado con precipitaciones menores a los 200 mm. Este patrón espacial de precipitación es reproducido por WRF 24h y WRF 48h, como se muestra en la Fig. 3 y Fig. 4, respectivamente, de forma cercana a ERA5, con precipitaciones > 400mm hacia el suroeste y precipitaciones < 200 mm hacia el norte, noreste, sureste y centro del estado de Chihuahua. No obstante, el modelo presenta un sesgo húmedo principalmente en zonas altas del estado y un sesgo seco hacia la región sureste y este del estado, como se muestra en la Fig. 3d y Fig. 3e.



Fig. 3. Precipitación acumulada (mm) durante todo el periodo de estudio de acuerdo con (a) ERA5, (b) WRF 24h, (c) WRF 48h, (d) diferencia entre WRF 24h y ERA5; y (e) diferencia entre WRF 48h y ERA5.



Fig. 4. (a) Promedio de precipitación diaria (mm/día) durante todo el periodo de estudio y (b) desviación estándar (mm/día) de acuerdo con ERA5, (c) – (d) similar a (a) – (b) pero para WRF 24h, (d) – (e) similar a (c) – (d) pero para WRF 48h.

En la Fig. 4 se muestra la precipitación promedio y desviación estándar a partir de ERA5, WRF 24h y WRF 48h para el periodo de estudio. La Fig. 4a muestra el patrón espacial de la precipitación diaria promedio durante todo el periodo a partir de ERA5, se puede observar que la regiones más lluviosas (6 < pr < 10 mm/día) son principalmente hacia el suroeste del estado, mientras que las zonas menos lluvias se encuentran hacia el norte y noreste, consistente con la precipitación total sobre el periodo, ver Fig. 3. La variabilidad (desviación estándar) de la precipitación diaria de acuerdo con ERA5 se muestra en la Fig. 4b, se encontró un patrón espacial similar al descrito anteriormente, con las regiones con mayor variabilidad hacia zonas altas y valores de desviación estándar de ~6 mm/día a ~ 9 mm/día; y valores de ~1 a ~3 mm/día hacia el norte y noreste del estado. Estos patrones espaciales para la precipitación diaria promedio y desviación estándar son consistentes con las simulaciones de WRF 24h como se encontró en la Fig. 4c y Fig. 4d, y WRF 48h como se observa en la Fig. 4e y Fig. 4f. Las simulaciones del WRF pudieron mostrar las características principales del patrón temporal general y la distribución geográfica de la precipitación observada, lo cual es consistente con estudios previos en donde se evaluó WRF en otras regiones del mundo [12].

En la Fig. 5 se muestran las series de tiempo de la precipitación diaria promediada espacialmente sobre el estado de Chihuahua para ERA5, WRF 24h y WRF 48h, así como el ajuste lineal entra ERA5 y las simulaciones del WRF. A partir de la Fig.5a se observa que el modelo WRF reproduce de manera consistente la variabilidad diaria de la precipitación capturando eventos intensos como el que se muestra hacia finales del periodo. Las correlaciones entre las series de tiempo de ERA5 -WRF 24h y ERA5 - WRF 48h son 0.83 y 0.80, respectivamente, estadísticamente significativas a un intervalo de confianza del 99%. En la Fig. 5b se muestra la dispersión de los datos a partir de ERA y WRF 24h, así como su ajuste lineal del cual se obtuvo un coeficiente de determinación (\mathbb{R}^2) de 84.24%, lo cual indica que las serie de tiempo construida a partir de las primeras 24 h de simulación (WRF 24h) explica más del 84% de la varianza en las observaciones. Se realizó un procedimiento similar para la serie de tiempo construida a partir de las 48h de simulación (WRF 48h) y se obtuvo un coeficiente $\mathbb{R}^2 = 84.12\%$, la dispersión de los datos, así como el ajuste lineal se muestran en la Fig. 5c. Un valor de \mathbb{R}^2 mayor o igual a 0.5 (50%) puede considerarse aceptable [13, 14].



Fig. 5. (a) Precipitación diaria (mm) promediada espacialmente sobre el estado de Chihuahua para ERA5 (línea negra), WRF 24h (línea roja) y WRF 48h (línea azul), (b) ajuste lineal entre ERA5 y WRF 24h con $R^2 = 84.24\%$ y (c) ajuste lineal entre ERA5 y WRF 48h con $R^2 = 84.17\%$

B. Temperatura

En la Fig. 6 se muestra el promedio de la temperatura mínima (Tmin) para todo el periodo de análisis, la desviación estándar a partir de ERA5 y WRF, así como el error en el WRF. Los patrones espaciales de la temperatura mínima de acuerdo con ERA5, los cuales se muestran en la Fig. 6a, indican que las temperaturas más bajas (10°C < Tmin < 16 °C) se encontraron hacia el suroeste y este del estado y regiones altas, conforme nos desplazamos hacia el norte, noreste y este del estado las mínimas se ubican entre los 21 °C y 25 °C. Este patrón espacial es reproducido por WRF 24h y WRF 48h como se observa en la Fig. 6b y Fig. 6c, respectivamente, simulando las temperaturas más bajas hacia el suroeste, oeste y regiones altas del estado en un rango que va de ~11°C a ~18 °C; y las temperaturas mínimas simuladas hacia el norte, noreste y este se encontraron entre los ~20 °C y ~24 °C. En la Fig. 6d se encontró que, la mayor variabilidad a partir de las observaciones se localiza hacia la parte norte y noreste del estado con valores de 2°C a 3°C, las regiones más elevadas son las que mostraron la menor variabilidad con valores de ~0.5°C a ~1.5°C. Este patrón de variabilidad es reproducido por WRF para las series de tiempo construidas a partir de las 24h y 48h, el cual se muestra en la Fig. 6e y Fig. 6f, respectivamente, no obstante, hacia las regiones de mayor variabilidad, ver Fig. 6d, el modelo WRF muestra valores (~1.5 °C) menores comparado a ERA5 (~3 °C). Por otra parte, aun cuando el modelo reproduce el patrón espacial del promedio de temperatura mínima observado, ver Fig. 6a, presenta un sesgo cálido principalmente en zonas altas del estado y un sesgo frío hacia el sureste y este del estado, como se observa en la Fig. 6g y Fig. 6h.



Fig. 6. Promedio de temperatura mínima diaria (°C) durante todo el periodo de estudio de acuerdo con (a) ERA5, (b) WRF 24h y (c) WRF 48h. Desviación estándar (°C) de acuerdo con (d) ERA5, (e) WRF 24h y (f) WRF 48h. Diferencia entre (g) WRF 24h y ERA5; y (h) WRF 48h y ERA5.

En la Fig. 7 se muestra el promedio de la temperatura máxima (Tmax) para todo el periodo de análisis, la desviación estándar a partir de ERA5 y WRF, así como el error en el WRF. En la Fig. 7a, se presentan los patrones espaciales de la temperatura máxima de acuerdo con ERA5, estos indican que los valores de temperatura máxima menores (22 °C < Tmax < 25 °C) se encontraron hacia el suroeste, oeste y regiones altas del estado, mientras tanto, el norte, noreste y este del estado la Tmax se ubica entre los 29 °C y 34 °C. Este patrón espacial es consistente en WRF 24h y WRF 48h, como se observa en la Fig. 7b y Fig. 7c, respectivamente, simulando los valores más bajos de Tmax hacia el suroeste, oeste y regiones altas del estado en un rango que va de ~22 °C a ~26 °C; y los valores de Tmax más altos simulados (\sim 30 °C < Tmax < \sim 35 °C) se ubicaron hacia el norte, noreste y este de la región de estudio. La mayor variabilidad a partir de las observaciones se presentó hacia el norte y noreste del estado, como se presenta en la Fig.7 d, con valores de 3°C a 4°C, las regiones más altas son las que mostraron la menor variabilidad con valores de ~1.5°C a ~2.5°C. Este patrón espacial de variabilidad es reproducido por WRF 24h, el cual se observa en la Fig. 7e, y WRF 48h el cual se observa en la Fig. 7f, no obstante, hacia las regiones de mayor variabilidad, ver Fig. 7d, el modelo WRF muestra valores (~2.5 °C) menores comparado a ERA5 (~3.5 °C). Por otra parte, aun cuando el modelo reproduce el patrón espacial del promedio de Tmax observado, ver Fig. 7a, presenta un sesgo cálido (<~2 °C) principalmente en zonas altas del estado y un sesgo frío (~-0.5 °C) hacia el sureste y este del estado para el WRF 24h y WRF 48h como se revela en la Fig. 7g y Fig. 7h, respectivamente.

En la Fig. 8 se presenta el promedio de la temperatura promedio diaria (Tpro) durante el periodo de análisis, la desviación estándar a partir de ERA5 y WRF, así como la diferencia entre WRF y ERA5. En la Fig. 8a, los patrones espaciales de la Tpro de acuerdo al reanálisis ERA5 muestran que hacia el suroeste, oeste y regiones altas del estado se encuentra en un rango de 18 °C a 24 °C, mientras que, para el norte, noreste y este del estado la Tpro se ubica entre los 25 °C y 28 °C. Este patrón espacial es reproducido de forma consistente por WRF 24h y WRF 48h, como se observa en la Fig. 8b y Fig. 8c,



Fig. 7. Promedio de temperatura máxima diaria (°C) durante todo el periodo de estudio de acuerdo con (a) ERA5, (b) WRF 24h y (c) WRF 48h. Desviación estándar (°C) de acuerdo con (d) ERA5, (e) WRF 24h y (f) WRF 48h. Diferencia entre (g) WRF 24h y ERA5; y (h) WRF 48h y ERA5.

respectivamente, presentando los valores de Tpro en regiones del suroeste, oeste y regiones altas del estado en un rango que de ~19 °C a ~25 °C; y los valores de Tpro más altos simulados por WRF (~25 °C < Tpro < ~29 °C) se encontraron hacia el norte, noreste y este de la región de estudio. En la Fig. 8d se puede ver que, la mayor variabilidad a partir de ERA5 se presentó hacia el norte y noreste del estado con valores de 2.5 °C a 3.5 °C, similarmente a Tmin y Tmax, ver Fig. 6 y Fig. 7, respectivamente, las regiones más altas son las que mostraron la menor variabilidad con valores de ~1.0 °C a ~1.5 °C. El WRF 24h y WRF 48h reproduce de forma consistente este patrón espacial de variabilidad, como es visible en la Fig. 8e y Fig. 8f, respectivamente, sin embargo, hacia las regiones de mayor variabilidad, ver Fig. 8d, el modelo WRF muestra valores (~2.0 °C) menores comparado a ERA5 (~3.0 °C). Por otra parte, aun cuando el modelo WRF reproduce el patrón espacial del promedio de Tpro de acuerdo con ERA5, ver Fig. 8a, se encontró un sesgo cálido (< ~2 °C) principalmente en zonas altas del estado y un sesgo frío (~-1.5 °C) hacia el sureste y este del estado para el WRF 24h y WRF 48h, como se puede observar en la Fig. 8g y Fig. 8h, respectivamente. El sesgo en la temperatura mínima, máxima y promedio que presentó WRF podría deberse a la parametrización de capa límite planetaria, como lo sugieren estudios previos [15, 16].





La Fig. 9 muestra las series de tiempo de Tmin, Tmax y Tpro promediadas espacialmente sobre el estado de Chihuahua para ERA5, WRF 24h y WRF 48h, así como el ajuste lineal entre ERA5 y las simulaciones a partir de WRF. En la Fig. 9a se observa que el WRF reproduce consistentemente la variabilidad diaria de la Tmin capturando eventos mínimos que se presentaron hacia el inicio, mediados y finales del periodo de análisis. Las correlaciones entre las series de tiempo de Tmin para ERA5 -WRF 24h y ERA5 - WRF 48h son 0.82 y 0.74, respectivamente, estadísticamente significativas en un intervalo de confianza del 99%. En la Fig. 9b se muestra la dispersión de los datos a partir de ERA y WRF 24h, así como su ajuste lineal del cual se obtuvo un coeficiente R² de 84.72%. Para el caso de la serie de tiempo construida a partir de las 48h de simulación (WRF 48h) se obtuvo un coeficiente $R^2 = 72.36\%$, la dispersión de los datos, así como el ajuste lineal se muestran en la Fig. 9c. Similarmente que con Tmin, se encontró que el WRF reproduce consistentemente la variabilidad diaria de la Tmax, como se muestra en la Fig. 9d, en donde las correlaciones entre ERA5 – WRF 24h para la serie de tiempo de Tmax es 0.79 y para el caso de la correlación de las series de tiempo de Tmax entre ERA5 y WRF 48h fue de 0.76, ambas correlaciones son estadísticamente significativas en un intervalo de confianza del 99%. La dispersión de los datos a partir de ERA5 - WRF 24h y el ajuste lineal se muestra en la Fig. 9e, para el cual se obtuvo un R² de 75.19%. Para el caso de ERA5 y WRF 48h se obtuvo un $R^2 = 69.82\%$, como se muestra en la Fig. 9f. Para el caso de la Tpro, se encontró que el WRF reproduce la variabilidad diaria de forma consistente a ERA5, como se puede notar en la Fig. 9g. Las correlaciones entre las series de tiempo de Tpro para ERA5 -WRF 24h y ERA5 -WRF 48h resultaron en 0.86 y 0.82, respectivamente, estadísticamente significativas en un intervalo de confianza del 99%. La dispersión de los datos a partir de ERA5 y WRF 24h, así como el ajuste lineal se muestra en la Fig. 9h, para el cual se obtuvo un R² de 87.91%. En la Fig. 9i, se presentan los resultados para el caso de ERA5 y WRF 48h, para el cual se obtuvo un $R^2 = 81.72\%$.

Los valores de correlación entre ERA5 y la temperatura simulada son consistentes con Corrales et al. [17], en el cual loas autores evaluaron el modelo WRF, a partir de estaciones meteorológicas en México, utilizando una versión y configuración distintas del modelo a las utilizadas en este trabajo.

IV. CONCLUSIÓN

El uso de modelos numéricos como el WRF para simulación meteorológica es una herramienta fundamental y robusta para apoyar la toma de decisiones tanto a nivel gubernamental como del sector primario y sociedad en general, siendo además de gran valor para la investigación científica.

En este trabajo se evaluó el modelo WRF con datos del reanálisis ERA5 para las variables de precipitación, temperatura mínima, máxima y promedio para un periodo de 74 días, el cual comprendió del 20 de junio al 4 de septiembre de 2024. Cabe mencionar que durante este periodo se presenta la estación lluviosa y durante este mismo periodo se dan las temperaturas más cálidas del año.



Fig. 9. (a) Temperatura mínima diaria (°C) promediada espacialmente sobre el estado de Chihuahua para ERA5 (línea negra), WRF 24h (línea roja) y WRF 48h (línea azul), (b) ajuste lineal entre ERA5 y WRF 24h con R² = 84.72%, (c) ajuste lineal entre ERA5 y WRF 48h con R² = 72.36%. (d)
Temperatura máxima diaria (°C) promediada espacialmente sobre el estado de Chihuahua para ERA5 (línea negra), WRF 24h (línea roja) y WRF 48h (línea azul), (e) ajuste lineal entre ERA5 y WRF 24h con R² = 75.19%, (f) ajuste lineal entre ERA5 y WRF 24h con R² = 75.19%, (f) ajuste lineal entre ERA5 y WRF 48h con R² = 69.82%. (g) Temperatura promedio diaria (°C) promediada espacialmente sobre el estado de Chihuahua para ERA5 (línea negra), WRF 24h (línea roja) y WRF 48h (línea azul), (h) ajuste lineal entre ERA5 y WRF 24h con R² = 87.91%, (i) ajuste lineal entre ERA5 y WR

WRF 48h con $R^2 = 81.72\%$

A partir de los resultados presentados en este trabajo, se encontró que el WRF simula de manera consistente y certera estas variables, lo cual es de suma importancia para generar, a partir de éstas, otras variables derivadas como los son los grados día de desarrollo, horas frío, índices de estrés calórico, detección de focos de calor, heladas, evapotranspiración de referencia, aplicaciones de riego, control de plagas, entre otras, las cuales tienen una amplia aplicación en el sector agrícola, pecuario, forestal y social del estado de Chihuahua.

No obstante, el modelo continuará evaluándose de forma continua conforme se vaya generando un mayor periodo de simulaciones. Como trabajo en curso, se está trabajando en la evaluación del dominio nacional, ya que estas aplicaciones podrían ampliarse hacia otras regiones o estados del país. De manera adicional, se explorarán otras configuraciones del modelo, dado que los resultados presentados pueden estar influenciados por las parametrizaciones físicas empleadas. Un ejemplo de ello es el sesgo en temperatura encontrado, el cual, según estudios previos, se puede atribuir principalmente a la parametrización de la capa límite planetaria.

REFERENCIAS

- Prieto, R., Ma. A. Avendaño, L. G. Matías y H. Eslava. 2010. Tormentas severas. 1a. edición, México, Centro Nacional de Prevención de Desastres, 56p. ISBN: 978-607-7558-08-8.
- [2] Litta, A. J., U. C. Mohanty and Sumam Mary Ididcula. 2012. The diagnosis of severe thunderstorms with high-resolution WRF model. Journal of Earth System Science, vol. 121, No. 2, April 2012, pp. 297–316.
 [3] Magaña, V., Pérez, J. L., Vázquez, J. L., Carrisoza, E., y Pérez, J. (1999).
- [3] Magaña, V., Pérez, J. L., Vázquez, J. L., Carrisoza, E., y Pérez, J. (1999). El Niño y el clima. En V. O. Magaña Rueda (Ed.), Los impactos de El Niño en México (pp. 23-68). Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado el 1 de febrero de 2025, de https://www.atmosfera.unam.mx/wpcontent/uploads/2022/09/ElNino.pdf
- [4] Ramírez Gámez, C.A. y J.C. Cuevas Tello. 2012. Sistema automático para la predicción de desastres meteorológicos en las ciudades. Ide@s CONCYTEG, 7 (86), pp. 1021-1048.

- [5] INEGI. Clima. Recuperado el 03 de octubre, 2024, de https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/chih/territorio/cl ima.aspx
- [6] Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., Martens, B., Miralles, D., Piles, M., Rodr\iguez-Fernández, N., Zsoter, E., Buontempo, C., & Thépaut, J.N. (2021). ERA5-Land: a state-of-theart global reanalysis dataset for land applications. Earth System Science Data, 13(9), 4349–4383.
- [7] Janjie, Z., R. Gall, and M. E. Pyle. 2010. Scientific Documentation for the NMM Solver. NCAR Technical Note, NCAR/TN- 477+STR, 54 pp.
- [8] Liu, X.M.; Song, H.Q.; Lei, T.J.; Liu, P.F.; Xu, C.D.; Wang, D.; Yang, Z.L.; Xia, H.M.; Wang, T.H.; Zhao, H.P. Effects of natural and anthropogenic factors and their interactions on dust events in Northern China. Catena 2021, 196, 104919.
- [9] Chen, W.X.; Meng, H.; Song, H.Q.; Zheng, H. Progress in Dust Modelling, Global Dust Budgets, and Soil Organic Carbon Dynamics. Land 2022, 11, 176.
- [10] Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, Xiang-Yu Huang, W. Wang, Jordan G. Powers. 2008. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note, NCAR/TN-475+STR, 125 pp.
- [11] Gochis, D. J., Brito-Castillo L. and Shuttleworth W. J. (2006). Hydroclimatology of the North American Monsoon region in northwest Mexico. Journal of Hydrology, 316(1), 53-70.
- [12] Zhou, Y.; Mu, Z. Impact of Different Reanalysis Data and Parameterization Schemes on WRF Dynamic Downscaling in the Ili Region. Water 2018, 10, 1729. https://doi.org/10.3390/w10121729
- [13] Rodríguez, dÁ.N.M., and Benítez-Parejo, N. (2011). Simple linear and multivariate regression models. Allergologia et Immunopathologia, 39(3), 159-173.
- [14] Nguyen, T.Chi, Do, A.Ngoc, Pham, V.Van and Alexandr, G. (2022). Multiple linear regression analysis model and artificial neural network model to calculate and estimate the blast induced area of the tunnel face. A case study Deo Ca tunnel. Journal of Mining and Earth Sciences, 63(3), 43-52. https://doi.org/10.46326/JMES.2022.63(3).06.
- [15] Zhang, Y., V. Dulière, P. W. Mote, and Eric P. Salathé Jr., 2009: Evaluation of wrf and hadrm mesoscale climate simulations over the U.D. pacific northwest*. J. Climate, 22, 5511–5526. doi: http://dx.doi.org/10.1175/2009JCLI2875.1
- [16] Robert F. Banks, Jordi Tiana-Alsina, José María Baldasano, Francesc Rocadenbosch, Alexandros Papayannis, Stavros Solomos, and Chris G. Tzanis (2016). Sensitivity of boundary-layer variables to PBL schemes in the WRF model based on surface meteorological observations, lidar, and radiosondes during the HygrA-CD campaign. Atmospheric Research, 176-177, 185-201.
- [17] Corrales, A., Flores, H, Narváez, M. P., Ruíz, O. y González, L. A. (2015). Evaluación de la temperatura simulada por el modelo WRF en regiones agrícolas de México. Memoria de la XXVII Semana Internacional de Agronomía FAZ-UJED. http://faz.ujed.mx/files/memoria semana 2015.pdf

DECLARACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE DATOS

La configuración completa del modelo (namelist) se pone a disposición a través del correo del autor de correspondencia: corrales.arturo@inifap.gob.mx

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por el Gobierno del Estado de Chihuahua y la Secretaría de Desarrollo Rural del estado a través del proyecto No. 145236634 "Proyecto estratégico para la integración de datos hidrometeorológicos del estado de Chihuahua" y al INIFAP por el apoyo otorgado para llevar a cabo este trabajo. ACS agradece al CONAHCYT-SNII por el apoyo recibido.