

Pronóstico estadístico de GDD y HF para el norte de México mejorado por corrección de sesgo

Arturo Corrales-Suastegui^{1,§}
Miguel Ángel González-González¹
Gerardo Martínez-Díaz²
Noé Chávez-Sánchez³
Luis Antonio González-Jasso¹
Mario Primitivo Narváez-Mendoza¹

1 Campo Experimental Pabellón-INIFAP. Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México. CP. 20673.

2 Campo Experimental Costa de Hermosillo-INIFAP.

3 Campo Experimental Delicias-INIFAP. Delicias, Chihuahua. CP. 33000. C

Autor para correspondencia: corrales.arturo@inifap.gob.mx.

Resumen

La información que existe de pronósticos climáticos mensuales de variables agrometeorológicas como grados día de desarrollo y horas frío es escasa. En este trabajo se presentó la evaluación de un pronóstico estadístico de grados día de desarrollo y horas frío para el norte de México, con enfoque en regiones productoras de vid y nogal pecanero. El modelo de pronóstico se fundamenta en el método de años análogos, utilizando las anomalías de la temperatura superficial del mar a través del índice mensual Niño-3.4, el cual se basa en la base de datos ERSSTv5. Además, emplea bases de datos históricas mensuales de grados día de desarrollo y horas frío, correspondientes a los periodos 1925-2012 y 1950-2020, respectivamente. Para evaluar el modelo, se realizaron pronósticos retrospectivos mensuales de grados día de desarrollo y horas frío para un periodo de 12 años (2012-2023) y se contrastaron con observaciones. Se encontró que el modelo subestimó hasta en -100 grados días de desarrollo para regiones del sur y centro del país, mientras que para Sonora, Chihuahua, Durango y Coahuila se subestimaron los grados día de desarrollo con valores que van de -20 a -60 grados día de desarrollo. Para el caso de las horas frío, se encontró que el modelo subestimó hasta en 60 h frío, principalmente en Chihuahua, Durango, Zacatecas, Baja California y centro del país. A partir de estos resultados, se aplicó un método de corrección por sesgo, el cual se basó en la resta del sesgo medio, para reducir el error en el pronóstico. El modelo corregido mostró una reducción en el sesgo, principalmente en meses fríos. No obstante, se encontró un sesgo persistente en el modelo después de aplicar la corrección por sesgo.

Palabras clave:

años análogos, corrección por sesgo, grados día de desarrollo, horas frío.



License (open-access): Este es un artículo publicado en acceso abierto bajo una licencia **Creative Commons**

Introducción

La influencia de la temperatura en el crecimiento y desarrollo de las plantas es fundamental. Para establecer una relación precisa entre temperatura y la tasa de crecimiento de los organismos, se definen parámetros vitales conocidos como constantes térmicas, las cuales pueden estimarse dentro de un rango que va desde la temperatura base hasta el umbral máximo.

Estas constantes térmicas se expresan en grados día de desarrollo (GDD) y se emplean en agricultura para modelar las fases de desarrollo tanto de plantas como de insectos. De manera complementaria, las horas frío (HF) se utilizan para modelar la brotación de frutales caducifolios. La fenología de plantas e insectos, cuando se modela con base en unidades térmicas, proporciona una medida más precisa del tiempo fisiológico en comparación con el calendario tradicional (Terence *et al.*, 1984; McMaster y Wilhelm, 1997; Luedeling *et al.*, 2011).

Los GDD permiten cuantificar la acumulación de calor a lo largo de un período específico de tiempo, siendo una medida ampliamente utilizada en modelos agrícolas. Esta herramienta es clave para optimizar actividades como la programación de riegos, la planificación de tratamientos fitosanitarios, la determinación del momento óptimo de cosecha y la estimación de la fecha de madurez de los cultivos (McMaster y Wilhelm, 1997). Por su parte, las HF representan el tiempo fisiológico acumulado en el cual un frutal se encuentra a temperaturas inferiores a un umbral determinado, generalmente 7.2 °C, durante los meses invernales.

Durante este período, el árbol entra en un estado de reposo con mínima actividad fisiológica, lo que significa que no crece ni florece activamente. Este reposo invernal es crucial para la brotación, desarrollo y productividad del árbol en la siguiente temporada de crecimiento (Luedeling *et al.*, 2011; Campoy *et al.*, 2011; Liu and Sherif, 2019). Las HF son particularmente importantes en la producción de frutas de clima templado, como manzanas, uvas, peras, duraznos, cerezas y ciruelas.

Se refieren al número de horas en las que la temperatura se mantiene por debajo de un umbral específico durante el invierno, lo cual es esencial para garantizar un buen desarrollo en la siguiente temporada (Luedeling, 2012). Los patrones de temperatura pueden variar de un año a otro, lo que afecta la acumulación de GDD y HF y por ende, influye directamente en el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Un estudio reciente realizado por Corrales-Suastegui *et al.* (2022) sugiere que, hacia finales de siglo, las temperaturas podrían aumentar hasta ~3.5 °C bajo un escenario de altas emisiones.

Este incremento propiciaría un aumento en los GDD y, como consecuencia, una posible disminución en la acumulación de HF. Además, se proyectan veranos secos y otoños húmedos en los estados de Sonora, Chihuahua, Durango y Coahuila, una de las principales regiones productoras de nogal pecanero y uva de mesa en México. En esta región, según datos del SIAP, en 2022 se exportaron aproximadamente 72 000 t de nuez, generando un valor de alrededor de 640 millones de dólares, mientras que la producción de uva alcanzó las 300 000 t.

Por estas razones, contar con pronósticos climáticos mensuales y estacionales de GDD y HF resulta ser una herramienta de gran utilidad. Con esta información, los productores del sector agrícola podrían adaptar sus prácticas, lo que podría incluir la selección de variedades de cultivos más resistentes al calor, así como la definición de criterios más efectivos para la programación del riego en sistemas presurizados eficientes, como lo sugieren estudios previos (Flores-Gallardo *et al.*, 2012).

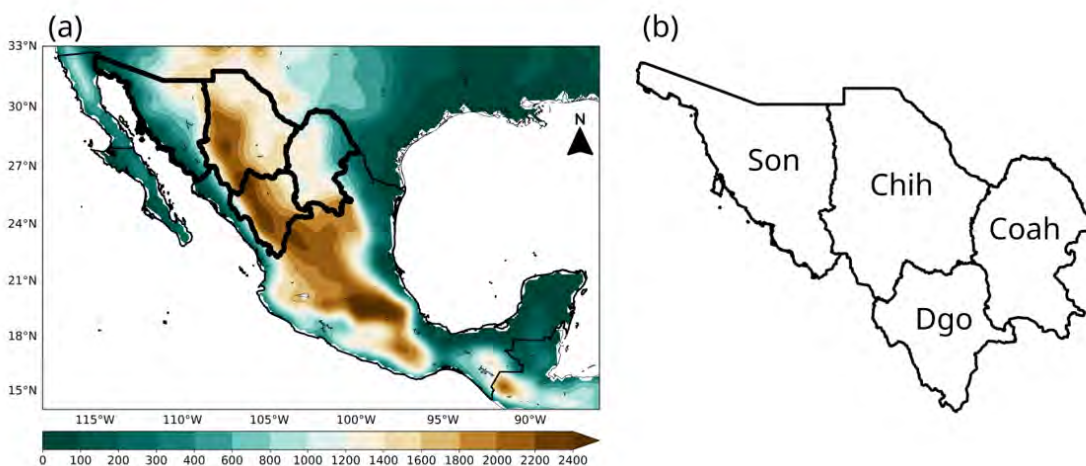
El objetivo de esta publicación es presentar la tecnología desarrollada por el INIFAP, denominada pronóstico mensual de grados día de desarrollo y horas frío para regiones productoras de nogal pecanero y vid (ProNOVIDclim). Esta tecnología es adaptable a diferentes regiones del país y cultivos, contribuyó así a mejorar la gestión agrícola.

Materiales y métodos

Área de estudio

Las principales regiones productoras de nuez pecanera se encuentran en el norte de México en los estados de Chihuahua, Coahuila, Sonora y Durango (Figura 1), los cuales representan el 12.62, 7.73, 9.15 y 6.29% del territorio del país, respectivamente (INEGI, 2020). Por otra parte, Coahuila, Durango y Sonora son estados productores de vid, siendo Sonora el principal productor de uva de mesa del país (SIAP, 2022).

Figura 1. a) México (en línea negra), topografía (m) y área de estudio (resaltada en línea negra gruesa), la flecha indica el norte y b) Chih, Coah, Son y Dgo se refieren a los estados de Chihuahua, Coahuila, Sonora y Durango, respectivamente.



En el Cuadro 1, se presentan los datos anuales de precipitación (Prec), temperatura máxima (Tmax), mínima (Tmin) y promedio (Tmed) de estos estados a partir de datos de la CONAGUA, disponibles en (<https://historico.datos.gob.mx/busca/dataset/>):

Cuadro 1. Climatología 1991-2020 de precipitación, temperatura máxima, mínima y promedio anuales para los estados que conforman la región productora de nogal pecanero y vid.

	Prec (mm)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Tmed (°C)
Coahuila	400.5	28.8	13.3	21.1
Chihuahua	454.3	27	9.5	18.2
Durango	449.8	26.8	8.9	17.9
Sonora	420.4	31.4	13.6	22.5

Datos

Para las simulaciones se utilizaron datos diarios de temperatura máxima (Tmax) y temperatura mínima (Tmin) de la base de datos de observaciones en malla de Livneh con 1/16° (~6 km) de resolución espacial, la cual cubre completamente a México, a los Estados Unidos de América y al sur de Canadá para el periodo 1925-2013 (Livneh *et al.*, 2015, <ftp://192.12.137.7/pub/dcp/archive/OBS/livneh2014.1-16deg/>), la cual ha sido utilizada en estudios previos de simulación en México para analizar grados día (Corrales-Suastegui *et al.*, 2021) y datos horarios de temperatura del reanálisis ERA5 Land (ERA5 en adelante) (disponibles desde 1950) del Centro Europeo de Pronóstico del Tiempo a Medio Plazo (ECMWF), por sus siglas en inglés a una resolución horizontal de ~11 km (Muñoz-Sabater *et al.*, 2021).

Para evaluar el modelo de pronóstico, se utilizaron datos horarios de ERA5 y diarios de Tmax y Tmin de la base de datos de observaciones en malla del CPC Global Temperature con resolución espacial de 0.5° disponibles desde el 01 de enero de 1979 hasta el presente y son proporcionados por el Noaa/Oar/Esrl Psl, Boulder, CO, USA, desde su sitio web <https://psl.noaa.gov/>, fecha de consulta: 01/mayo/2024.

Grados día de desarrollo

Para calcular los GDD se implementó el método del seno simple desarrollado por Baskerville y Emin (1969). Este método ajusta una curva seno a las temperaturas máximas y mínimas para un día. En el cálculo se utiliza un umbral inferior y otro superior de temperatura, 10 y 30 °C, respectivamente, para obtener el área bajo la curva. Este método considera seis casos diferentes para calcular los GDD de acuerdo con el comportamiento diario de las temperaturas. Para una descripción completa de este método consultar: <http://ipm.ucanr.edu/WEATHER/ddss-tbl.html>.

Horas frío

Las HF se calcularon según el modelo de horas frío (Chilling Hours Model) de Chandler (1942), el cual es el método más común para calcular el frío invernal (Luedeling y Brown, 2011; Chhetri *et al.*, 2018). El modelo considera que las temperaturas entre 0 y 7.2 °C tienen un efecto de enfriamiento, y cada hora a temperaturas entre estos umbrales contribuye con una HF (Luedeling (2012). Se pudo expresar lo anterior de la siguiente manera:

$$nch_k = \sum_{i=1}^{24} ch_i^k, ch_i^k = \begin{cases} 1, & 0 < T_i^k < 7.2 \\ 0, & \text{otro caso} \end{cases}$$

1). Donde: nch_k son las HF acumuladas en el día k , $i = 1, 2, 3, \dots, 24$ es la hora en el día k ; ch_i^k y T_i^k son las HF y la temperatura, respectivamente, en la hora i durante el día k . Las HF mensuales se calcularon a partir de la ecuación 1.

Modelo de pronóstico

El pronóstico de GDD y HF se realiza mediante años análogos (AA), esto es, identifica años pasados que tengan similitud con las condiciones actuales del fenómeno de El Niño Oscilación Sur (ENOS), para esto se utilizó como métrica la raíz cuadrada del error cuadrático medio. En este trabajo los AA se obtuvieron a partir de la tecnología PronEst del INIFAP (Corrales-Suastegui *et al.*, 2014). Los GDD históricos se calcularon a partir de la base de datos de Livneh para el periodo 1925-2012. La base de datos de HF históricas se obtuvo a partir de ERA5 para el periodo 1950-2020.

Programa de cómputo del modelo de pronóstico

El núcleo central de ProNOVIDclim, es el programa de cómputo (programa, en adelante) para la implementación del modelo de pronóstico, el cual se desarrolló en el sistema operativo GNU/Linux utilizando programación en Bash, la herramienta Climate Data Operators (CDO) y el lenguaje de programación Python 3, los cuales son de acceso libre. En la Figura 2 se muestra un fragmento del código fuente del programa, cuyo desarrollo cuenta con registro de derechos de autor, RPDA: 03-2024-120915472700-01.



Figura 2. Fragmento del código fuente del programa de ProNOVIDclim.

```

echo "
#####
## Arturo Corrales Suastegui. INIFAP.CEPAB, 11/03/2024. e-mail: corrales.arturo@inifap.gob.mx; acsuastegui@gmail.com. RPD: 83-2024-120915472700-01
## Pronóstico de Grados Día Desarrollo (GDD) y Horas Frío (HF) mensuales utilizando años análogos (AA) por medio de la tecnología INIFAP-PronEst.
## Pronóstico mensual extendido de 1 hasta 3 meses para el periodo Octubre, Noviembre, Diciembre, Enero, Febrero, Marzo y Abril.
## Este desarrollo tecnológico se integra como parte de AgroPron: https://www.dropbox.com/sh/lgttlihcsmj4d8x/AADXYm4WjcXCsQcDy12e5c7Xa7dl=B
#####
## Este programa requiere librerías netcdf, CDO, python 3 y las librerías de python: numpy, matplotlib, basemap, basemap-data-hires, netCDF4, scipy para su
## correcto funcionamiento
## Para instalar en Debian/Ubuntu, por ejemplo, ejecute las siguientes dos líneas de código en la terminal:
## sudo apt install cdo python3
## pip install numpy matplotlib basemap basemap-data-hires netCDF4 scipy
## El siguiente paquete es para visualizar archivos netcdf y su instalación es opcional.
## sudo apt install ncview
## Para su uso, desde una terminal ejecute: ncview archivo.nc
## Nota: El software se probó en Ubuntu 22.04 LTS, 24.04 LTS
#####

echo "Indique la opción de una variable a pronosticar: 1 para GDD, 2 para HF. (ejemplo: 1)"
read pron

if [ -z ${pron} ]
then
echo "No se ingresó opción."
else
if [ ${pron} == 1 ]
then
cd GDD_1925-2012_ONDJFMA
chmod +x GDDAgroPronAA_v4.sh
./GDDAgroPronAA_v4.sh
cd ..
elif [ ${pron} == 2 ]
then
cd HF_1950-2020_ONDJFMA
chmod +x ChillHourAgroPronAA_v4.sh
./ChillHourAgroPronAA_v4.sh
cd ..
fi

```

A modo ilustrativo, se calculó el pronóstico para el periodo noviembre-enero 2023-2024. Al iniciar el programa, se despliega información sobre la tecnología y se proporcionan instrucciones para la instalación de las librerías requeridas, en caso de ser necesario. Además, el usuario debe ingresar los datos correspondientes al periodo y la variable a pronosticar. Una vez ingresada esta información, el proceso de cálculo del pronóstico se ejecuta automáticamente. Al concluir el cálculo, el sistema notificará al usuario la finalización del proceso.

Los resultados del pronóstico se almacenan en una carpeta generada automáticamente durante la ejecución del programa. El nombre de la carpeta sigue la estructura 'año de inicio del pronóstico' seguido por los meses pronosticados (año-m1m2m3); en el ejemplo anterior, la carpeta se designará como '2023-111201'. En esta carpeta se encuentran las salidas del modelo como: mapas de i) pronóstico; ii) anomalías y iii) climatologías de los meses pronosticados en formato PNG y como archivos de datos en formato netCDF. Estos archivos pueden ser visualizados y procesados en sistemas de información geográfica, como QGIS.

Resultados y discusión

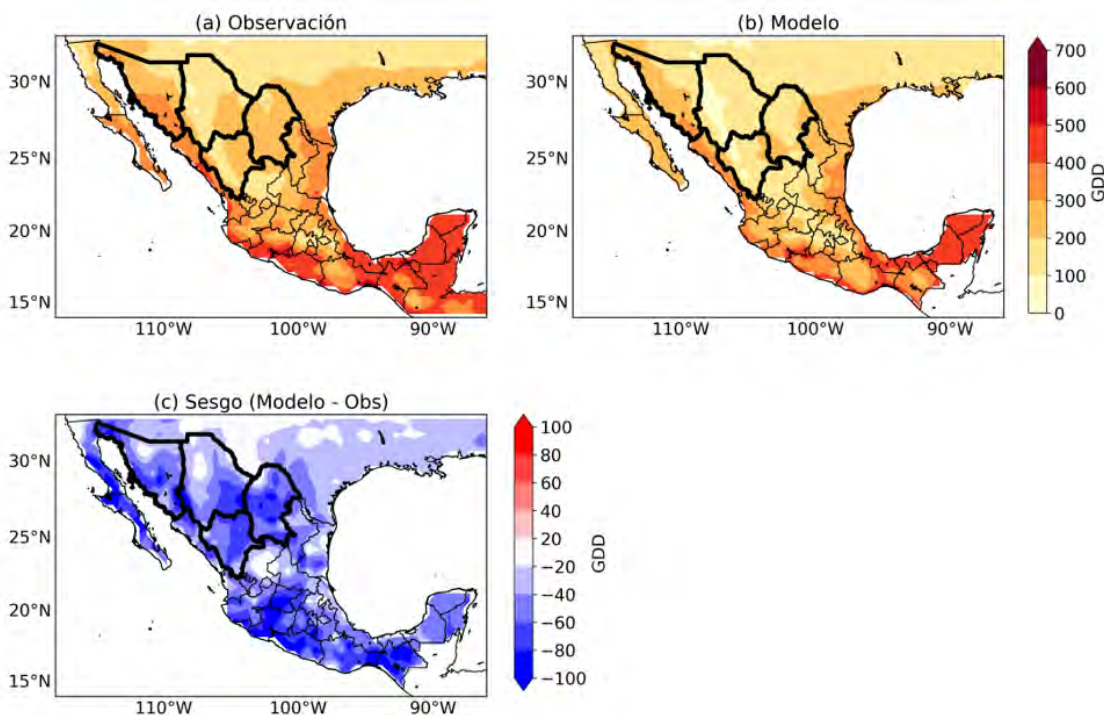
El pronóstico estacional puede proporcionar información potencialmente útil de la suficiencia de frío para cada cultivo. La falta de frío invernal limita que cultivos como, algunos frutales, vid y nueces tengan una brotación temprana y completa, para que alcancen su máximo rendimiento, además de reducir la calidad de estos. Un pronóstico anticipado sobre el frío invernal de los próximos meses puede ayudar a los productores a gestionar la falta de frío para minimizar estos impactos negativos (Jha y Pathak, 2024).

Para evaluar el modelo se realizaron pronósticos retrospectivos mensuales de GDD y HF para un periodo de 12 años (2012-2023) durante el 'año frío' que inicia en octubre del año k y termina en abril del año k+1. De esta manera, por ejemplo, el 'año frío' que corresponde a 2012 será de octubre 2012 a abril 2013 y así sucesivamente para los demás años, hasta finalizar con el 'año frío' 2023 (octubre 2023-abril 2024).

En la Figura 3 se muestra el promedio de 12 años frío durante 2012-2013 para los GDD. Las observaciones a partir de CPC (Figura 3a) muestran valores máximos de GDD en la Península de Yucatán y estados del sur de México, mientras que, para estados de la región productora de nogal

pecanero y vid se encontraron valores de $100 < \text{GDD} < 400$ para Sonora, $200 < \text{GDD} < 300$ para Coahuila y de $100 < \text{GDD} < 300$ para Durango y Chihuahua, lo cual es consistente con Corrales-Suastegui *et al.* (2022).

Figura 3. a) promedio de 12 'años frío' (2012-2023) de GDD mensuales de acuerdo con CPC; b) promedio de 12 'años frío' de GDD a partir del modelo y c) diferencia (modelo-observación) en GDD.

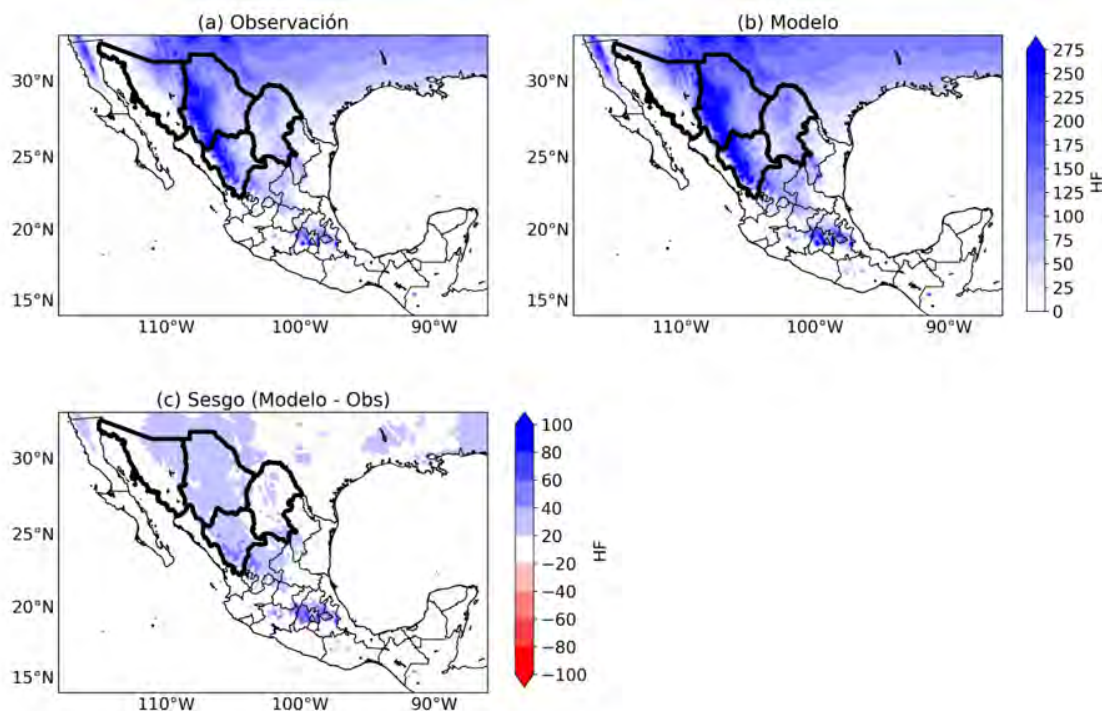


Por otra parte, el modelo (Figura 3b), reproduce este patrón espacial, con máximos de GDD en la Península de Yucatán y estados del sur de México y valores de $100 < \text{GDD} < 300$ para Sonora, Chihuahua, Coahuila y Durango. No obstante, el modelo mostró un sesgo frío (Figura 3c), subestimó hasta en -100 GDD para regiones del sur y centro del país, mientras que para Sonora, Chihuahua, Durango y Coahuila se subestimaron los GDD con valores que van de -20 a -60 GDD.

En la Figura 4 se muestra el promedio de 12 años frío durante 2012-2023 para las HF. La media de HF a partir de ERA5 (Figura 4a) muestra valores máximos $\text{HF} > 200$ en zonas altas de Durango y Chihuahua, así como en regiones del centro de México mientras que, para el norte de Sonora y zonas de Chihuahua, Coahuila y Durango las HF se encontraron en un rango de 75 a 175 HF. Por otra parte, el modelo (Figura 4b) reproduce este patrón espacial, con máximos de HF zonas altas de Durango, Chihuahua y en regiones del centro de México, así como valores de $75 < \text{HF} < 200$ en el norte de Sonora y zonas de Chihuahua, Coahuila y Durango.



Figura 4. a) promedio de 12 'años frío' (2012-2023) de HF mensuales de acuerdo con ERA5; b) promedio de 12 'años frío' de HF a partir del modelo y c) sesgo (modelo-obs) en HF.



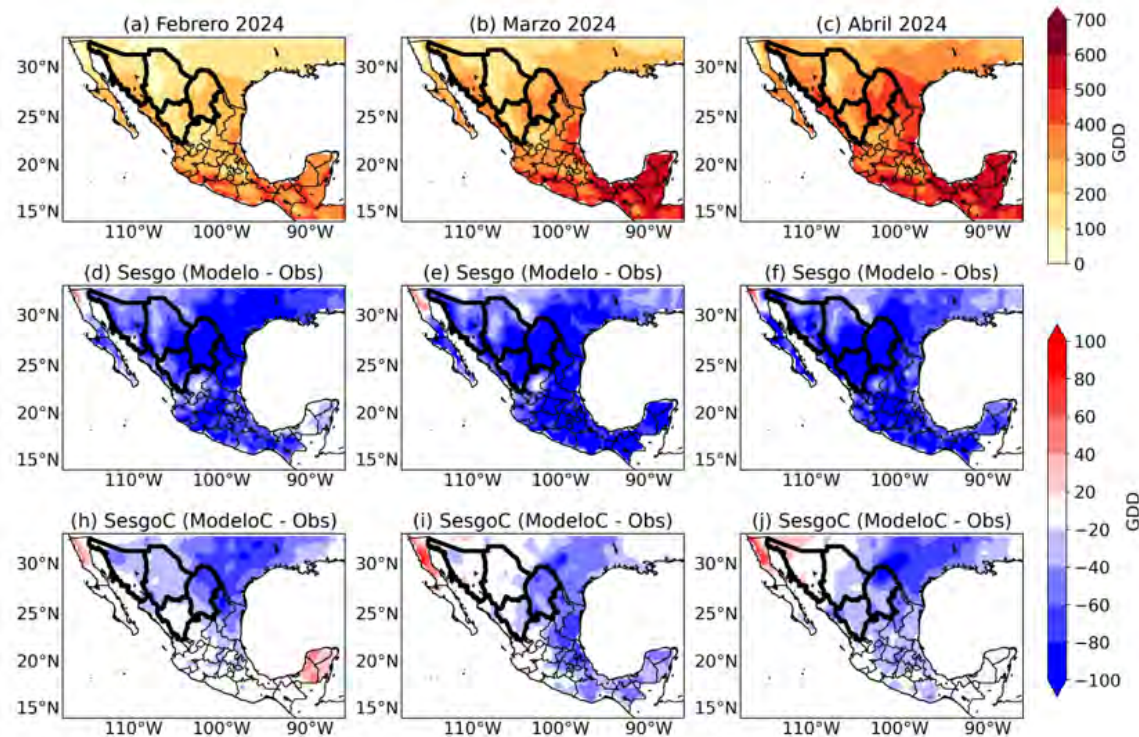
En la Figura 4c se muestra que el modelo sobreestimó las HF en rango de 20 a 40 HF principalmente en Durango, Chihuahua y el norte de Sonora, lo anterior indica que el modelo presentó un sesgo frío en HF, lo cual es consistente con lo que se encontró para los GDD (Figura 3c).

Una que vez que se calculó el sesgo del modelo (Figura 3 y 4), se seleccionaron los 'años frío' correspondientes al período 2012-2022, con lo cual se realizó el promedio interanual correspondiente para cada mes pronosticado y observado y se realizó la diferencia entre el modelo y la observación, con esto se obtuvo el error promedio mensual para GDD y HF. Lo anterior, permitió aplicar una técnica de corrección por sesgo bastante sencilla; por ejemplo, si se calcula el pronóstico para febrero, marzo y abril de 2024, se puede estimar un pronóstico corregido (ModeloC) restando el error promedio mensual correspondiente al mes pronosticado.

Una técnica similar se ha utilizado para remover el sesgo en simulaciones cortas mediante un modelo de mesoescala (Stensrud y Skindlov, 1996). La corrección del sesgo es importante para mejorar tanto la calidad como el valor del pronóstico (Anghileri *et al.*, 2019). Lo anterior, se muestra en la Figura 5 para febrero-abril 2024. La Figura 5a-c son los GDD observados para febrero, marzo y abril, respectivamente. En la Figura 5d-f se presenta el sesgo del modelo sin corregir (sesgo) correspondiente a febrero, marzo y abril, respectivamente.



Figura 5. Los GDD mensuales observados para a) febrero, b) marzo y c) abril de 2024. El sesgo (modelo-obs) para d) febrero, e) marzo y f) abril; (h-j) similar a (d-f) pero para el sesgoc (modeloc-obs).

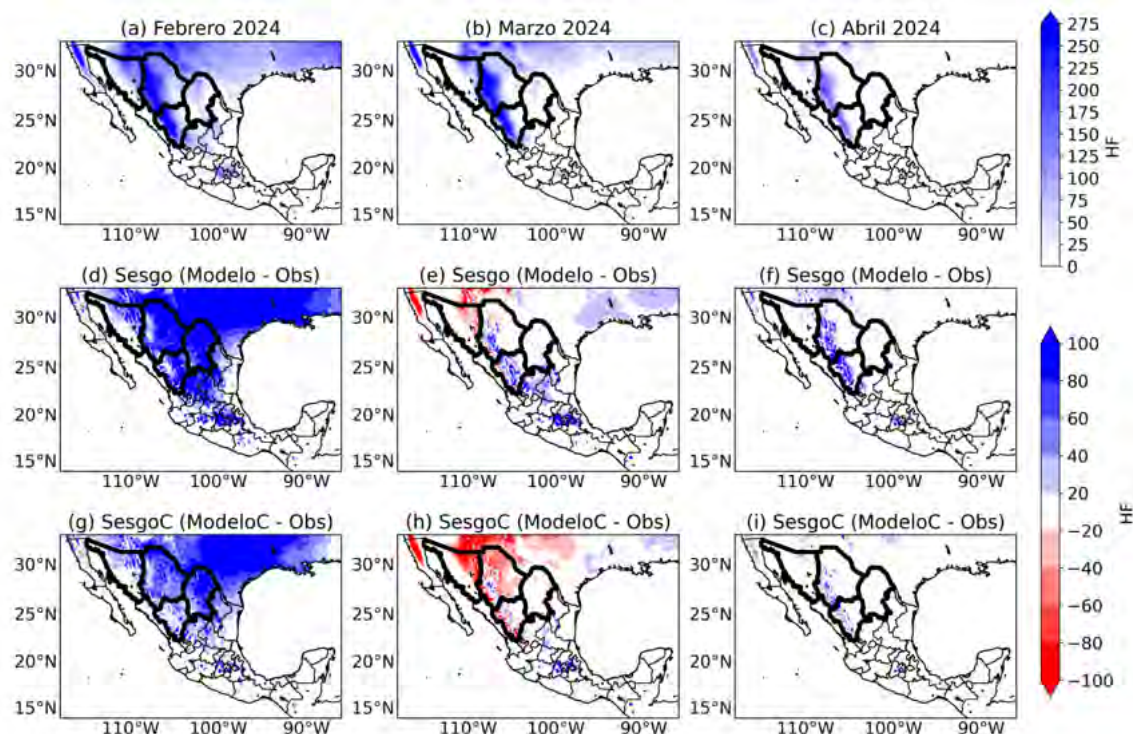


El sesgo del modelo corregido (sesgoc) se muestra en la Figura 5h-j para el mismo periodo. El sesgo se muestra en la Figura 5d-f, este presenta valores que van de los a -40 a -80 GDD en Sonora y Chihuahua y de hasta -100 GDD en Durango y Coahuila. No obstante, al aplicar la corrección por sesgo (Figura 5h-j) se encontró una reducción considerable en el error del modelo (sesgoc), donde predominan valores en el sesgo de 20 a -20 GDD y en el intervalo de -20 a -40 GDD, excepto en la zona norte de Coahuila durante febrero (Figura 5h) y marzo (Figura 5i) en donde se alcanzaron valores de -60 -80 GDD; lo anterior, pudiera deberse a que la base de datos del CPC es más cálida con respecto a Livneh o ERA5, como lo muestran estudios previos (Corrales-Suastegui *et al.*, 2011).

Similarmente para HF, en la Figura 6 se muestra el periodo de febrero-abril 2024 de las HF observadas (Figura 6a-c), el sesgo (Figura 6d-f) y el sesgoc (Figura 6h-j). El modelo sin corregir presenta el mayor sesgo durante febrero (Figura 6d) con valores que van de 80 a 100 HF en Durango, Coahuila y Chihuahua; mientras que, en regiones de Sonora se encontraron valores de hasta 100 HF. Por otra parte, en marzo y abril, los valores en el sesgo se presentan entre 20 a 60 HF en Durango y Chihuahua, con excepción de del norte de Sonora en donde presentó valores negativos de hasta -60 HF (Figura 6e, f).



Figura 6. Las HF mensuales observadas para a) febrero, b) marzo y c) abril de 2024. El sesgo (modelo-obs) para d) febrero, e) marzo y f) abril. (h-j) similar a (d-f) pero para el sesgo a partir del modelo corregido (sesgoC, modeloC-obs).



Al aplicar la corrección por sesgo (Figura 6h-j), se encontró una reducción en el error del modelo, donde, para febrero Figura 6h, predominan valores en el sesgo de 20 a 60 HF en Durango, Chihuahua y Coahuila, solo la región norte de Coahuila presentó valores en el sesgo aún similares a la versión de modelo sin corregir (Figura 6d). Para el caso de marzo (Figura 6h) el sesgo se redujo en Durango, mientras que, para Chihuahua y Sonora el sesgo tomó valores negativos de -20 a -60 HF y presentó sesgo en regiones que no se observó en la versión sin corregir (Figura 6e). En contraste, durante abril (Figura 6i), el sesgo se redujo de manera considerable (~50 %) con valores menores a 40 HF.

Lo anterior sugiere que, para los meses más fríos, la corrección por sesgo pudiera mejorar de forma considerable el pronóstico de HF, así como para el mes de abril; sin embargo, durante la transición de invierno a primavera durante marzo, aplicar la corrección por sesgo pudiera no presentar una mejora en el pronóstico de HF. Trabajos previos han reportado sesgos persistentes en modelos después de aplicar la corrección por sesgo, lo cual se pudiera explicar debido al clima altamente variable de algunas regiones (Lorenz *et al.*, 2021).

Conclusiones

En este trabajo se evaluó un pronóstico estadístico mensual extendido a tres meses de GDD y HF para México con énfasis en regiones productoras de nogal pecanero y vid. El modelo reprodujo los patrones espaciales de las variables pronosticadas de GDD y HF conforme al periodo de evaluación. Sin embargo, el pronóstico mostró un sesgo negativo en los GDD y positivo en las HF. A partir del error promedio de doce años, se aplicó una técnica sencilla de corrección por sesgo.

El modelo corregido mostró una mejor habilidad en el pronóstico al reducir considerablemente el sesgo, principalmente en meses fríos y en la región productora de nogal pecanero y vid. No

obstante, se encontró un sesgo persistente en el modelo después de aplicar la corrección por sesgo, lo cual se pudiera explicar a partir del clima altamente variable de algunas regiones de la zona de estudio.

Como trabajo en curso, se está integrando ERA5 como base de datos de GDD y se ampliará el periodo histórico hasta 2024 para ambas variables, lo cual se verá reflejado en una versión superior del programa de cómputo. Este trabajo resalta la necesidad de generar y evaluar periódicamente, para este sector geográfico y agroindustrial, un pronóstico estacional de GDD y HF. Esto permitió proveer a los productores de estos cultivos, herramientas para la toma de decisiones relacionadas al nogal pecanero y vid de la región.

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por el INIFAP; a través, del proyecto Núm. 1450387395: pronóstico mensual de grados día desarrollo y horas frío para regiones productoras de nogal pecanero y vid. El doctor Arturo Corrales-Suastegui, agradece a la SECIHTI-SNII por el apoyo recibido.

Bibliografía

- 1 Anghileri, D.; Monhart, S.; Zhou, C.; Bogner, K.; Castelletti, A.; Burlando, P. and Zappa, M. 2019. The value of subseasonal hydrometeorological forecasts to hydropower operations: how much does preprocessing matter? *Water Resour. Res.* 55(12):10159-10178. <https://doi.org/10.1029/2019WR025280>.
- 2 Baskerville, G. L. and Emin, P. 1969. Rapid estimation of heat accumulation from maximum and minimum temperatures. *Ecology.* 50(3):514-517.
- 3 Campoy, J. A.; Ruiz, D. and Egea, J. 2011. Dormancy in temperate fruit trees in a global warming context: a review. *Scientia Horticulturae.* 130(2):357-372. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.07.011>
- 4 Chandler, W. H. 1942. *Deciduous orchards.* Lea and Febiger, Philadelphia. 438 p.
- 5 Chhetri, A.; Ramjan, M. D. and Dolley, N. 2018. Various models of calculating of chill units in fruits crops. *Indian Farmer.* 5(04):439-442.
- 6 Corrales-Suastegui, A.; Martínez-Díaz, G.; Ruiz-Álvarez, O.; González- González, M. A. and Pavia, E. G. 2022. Temperature and precipitation towards the end of the 21st Century in pecan producing areas of Mexico. *Advanced Modelling and Innovations in Water Resources Engineering.* 235-254 pp. Singapore: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-4629-4-18>.
- 7 Corrales-Suastegui, A.; Ruiz-Alvarez, O.; Torres-Alavez, J. A. and Pavia, E. G. 2021. analysis of cooling and heating degree days over Mexico in present and future climate. *Atmosphere.* 12(9):1131. <https://doi.org/10.3390/atmos12091131>.
- 8 Corrales-Suastegui, A.; González-Jasso, L. A.; Narváez-Mendoza, M. P.; González González, M. A.; Ruiz-Álvarez, O. y Maciel-Pérez, L. H. 2014. PronEst: aplicación informática para generar pronósticos estacionales de lluvias y heladas de uno a tres meses. INIFAP-CIRNOC-CEPAB. Folleto técnico núm. 62. 21 p.
- 9 Flores-Gallardo, H.; Ojeda, W.; Flores, H.; Mejía-Sáenz, E. e Ibarra, E. 2012. Grados día y la programación integral del riego en el cultivo de papa. *Terra Latinoamericana.* 30(1):59-67.
- 10 INEGI. 2020. <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/default.aspx?tema=me>.
- 11 Jha, P. K. and Pathak, T. B. 2024. Seasonal climate forecasts show skill in predicting winter chill for specialty crops in California. *Commun Earth Environ.* 5:485. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01623-0>.

- 12 Liu, J. and Sherif, S. M. 2019. Combating spring frost with ethylene. *Frontiers in Plant Science*. 10:1408. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01408>.
- 13 Livneh, B.; Bohn, T. J. and Pierce, D. W. 2015. A spatially comprehensive, hydrometeorological dataset for Mexico, the US. and Southern Canada 1950-2013. *Sci. Data*. 2:150042. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.42>.
- 14 Lorenz, C.; Portele, T. C.; Laux, P. and Kunstmann, H. 2021. Bias corrected and spatially disaggregated seasonal forecasts: a long-term reference forecast product for the water sector in semi-arid regions. *Earth System Science Data*. 13(6):2701-2722.
- 15 Luedeling, E. 2012. Climate change impacts on winter chill for temperate fruit and nut production: a review. *Scientia Horticulturae*. 144:218-229.
- 16 Luedeling, E. and Brown, P. H. 2011. A global analysis of the comparability of winter chill models for fruit and nut trees. *International Journal of Biometeorology*. 55:411-421. [10.1007/s00484-010-0352-y](https://doi.org/10.1007/s00484-010-0352-y).
- 17 Luedeling, E., Girvetz, E. H., Semenov, M. A. and Brown, P. H. 2011. Climate change affects winter chill for temperate fruit and nut trees. *PLoS One*. 6(5):e20155. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0020155>.
- 18 McMaster, G. S. and Wilhelm, W. W. 1997. Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology*. 87(4):291-300.
- 19 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. G.; Piles, M.; Rodriguez-Fernández, N. J.; Zsoter, E.; Buontempo, C. and Thépaut, J. N. 2021. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*. 13(9):4349-4383.
- 20 SIAP. 2022. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 7-9 pp. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/771603/Produccion-Uva-en-Mexico.pdf>.
- 21 Stensrud, D. J. and Skindlov, J. A. 1996. Gridpoint predictions of high temperature from a mesoscale model. *Weather and Forecasting*. 11(1):103-110. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1996\)011<0103:gpohtf>2.0](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1996)011<0103:gpohtf>2.0).
- 22 Terence, L. W.; Wu, H. I. Sharpe, P. J. H.; Scholfield, R. M. and Coulson, R. N. 1984. Modeling insect development rates: a literature review and application of a biophysical model. *Forum Annals of the Entomological Society of America*. 77(2):208-225.



Pronóstico estadístico de GDD y HF para el norte de México mejorado por corrección de sesgo

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 00 March 2025
Date accepted: 00 May 2025
Publication date: 15 October 2025
Publication date: Sep-Oct 2025
Volume: 16
Issue: esp30
Electronic Location Identifier: e4048
DOI: 10.29312/remexca.v16i30.4048
Article Id (other): 00011

Categories

Subject: Artículos

Palabras clave

Palabras clave

años análogos
corrección por sesgo
grados día de desarrollo
horas frío

Counts

Figures: 6
Tables: 1
Equations: 0
References: 22