

Comparación de metodologías de estimación de temperaturas horarias y horas frío para la producción frutal en Atltzayanca, estado de Tlaxcala, México

Comparação de metodologias de estimativa de temperaturas horárias e horas-frio para a produção frutícola em Atltzayanca, estado de Tlaxcala, México

Comparison of methods for estimating hourly temperatures and chill hours for fruit production in Atltzayanca, Tlaxcala State, Mexico

**Silvia Herrera Cortés, Maricela Hernández Vázquez,
Minerva Flores-Morales y Rogelio Bernal-Morales**

Universidad Autónoma de Tlaxcala, Facultad de Agrobiología, Licenciatura en Ciencias Ambientales
Tlaxco, estado de Tlaxcala, México

silvia.herrera@uatx.mx; mhernandezv@uatx.mx; minerva.flores.m@uatx.mx; 20151115@uatx.mx

Herrera: <https://orcid.org/0000-0002-72049837>

Hernández: <https://orcid.org/0000-0003-4562-2324>

Flores: <https://orcid.org/0000-0001-7482-9872>

Bernal-Morales: <https://orcid.org/0009-0001-9036-2456>

Resumen

La acumulación insuficiente de frío en los árboles frutales de clima templado repercute en el desarrollo de los procesos fenológicos de la planta, impactando en su producción. Los modelos de estimación de temperaturas horarias son importantes ante la incapacidad de algunas estaciones climatológicas para el conteo del frío acumulado en zonas templadas. En esta investigación se estimaron temperaturas horarias y horas-frío para el municipio de Atltzayanca, Tlaxcala, México a partir de registros diarios de temperatura máxima y mínima para el periodo comprendido de 1985 a 2023. Se utilizaron los modelos propuestos por Parton y Logan (1981), Linvill (1990) y el método CIBSE propuesto en Chow y Levermore (2007). En los análisis realizados, los tres modelos aplicados coinciden con una tendencia al aumento de la temperatura mínima disminuyendo la acumulación natural de frío invernal.

PALABRAS CLAVE: comparación de modelos; horas frío; temperaturas horarias.

Resumo

A acumulação insuficiente de frio nas árvores frutíferas de clima temperado afeta o desenvolvimento dos processos fenológicos da planta, impactando sua produção. Os modelos de estimativa de temperaturas horárias são importantes diante da incapacidade de algumas estações climatológicas de contabilizar o frio acumulado em zonas temperadas. Nesta pesquisa, foram estimadas temperaturas horárias e horas-frio para o município de Atltzayanca, Tlaxcala, México, a partir de registros diários de temperatura máxima e mínima para o período compreendido entre 1985 e 2023. Foram utilizados os modelos propostos por Parton e Logan (1981), Linvill (1990) e o método CIBSE proposto em Chow e Levermore (2007). Nas análises realizadas, os três modelos aplicados coincidem com uma tendência de aumento da temperatura mínima, diminuindo a acumulação natural de frio no inverno.

PALAVRAS-CHAVE: comparação de modelos; horas de frio; temperaturas horárias.

Abstract

Insufficient cold accumulation in temperate-climate fruit trees affects the development of the plant's phenological processes, thereby impacting its yield. Hourly temperature estimation models are important given the inability of some weather stations to measure accumulated chill hours in temperate zones. In this study, hourly temperatures and chill hours were estimated for the municipality of Atltzayanca, Tlaxcala, Mexico, based on daily records of maximum and minimum temperatures for the period from 1985 to 2023. The models proposed by Parton and Logan (1981), Linvill (1990), and the CIBSE method proposed in Chow and Levermore (2007) were used. In the analyses conducted, the three models applied all show a trend toward an increase in minimum temperature, thereby reducing the natural accumulation of winter cold.

KEYWORDS: chilling hour; hourly temperatures; model comparison.

1. Introducción

La acumulación insuficiente de frío, durante el periodo de dormancia en las plantas caducifolias de clima templado, afecta los procesos fenológicos (Tharaga *et al.*, 2016). La dormancia se caracteriza visualmente por la pérdida de hojas y crecimiento inapreciable (Yang *et al.*, 2021). En este proceso, la planta acumula temperaturas frías, hasta satisfacer sus necesidades de enfriamiento y después calor para desencadenar adecuadamente los estadios fenológicos (Fadón *et al.*, 2020). Para los frutales, los requerimientos de frío, diferentes para cada especie, se miden a través del concepto de horas-frío (hf), definidas como el número de horas en que la planta es sometida a temperaturas inferiores a los 7°C (Mendoza, 2020).

Ante el incremento en la temperatura global, estimado de 1.5°C para las siguientes décadas (IPCC, 2019), es importante para los fruticultores conocer el comportamiento de las hf acumuladas durante los meses más fríos, noviembre, diciembre de un año, enero y febrero del año siguiente.

Debido a la falta de estaciones climáticas que registren temperaturas en periodos cortos de tiempo, por ejemplo, cada media hora o cada hora dependiendo de las necesidades, es común utilizar métodos indirectos de cuantificación de hf por medio de datos climatológicos diarios sobre temperatura. En este sentido, Da Mota (1957) empleó un modelo de regresión lineal entre las hf determinadas por un termógrafo y la temperatura media mensual. Crossa-Raynoud (1956) asumió una relación lineal del tiempo en horas y la temperatura, logrando una estimación de las hf en términos de la temperatura máxima y mínima (Mendoza, 2020). Parton y Logan (1981), estimaron temperaturas horarias considerando la temperatura mínima y máxima, así como la altitud de la región en estudio; esta metodología utiliza un modelo senoidal para simular el comportamiento de la temperatura desde que sale el sol hasta el ocaso y un modelo exponencial para estimar temperaturas horarias desde que se oculta el sol hasta que sale. Linvill (1990) consideró un modelo similar, bajo el supuesto que la temperatura máxima se presenta

dos horas después del mediodía solar y que la temperatura mínima se alcanza cerca de la hora del amanecer. Otros modelos similares son los estudiados por Ephrath *et al.* (1996), quienes hacen una modificación al modelo senoidal y exponencial para la estimación de las temperaturas diurnas y nocturnas. También se ha realizado estimación de temperaturas horarias a través de análisis armónico como los realizados en Panfosky y Brier, (1960); Isikue *et al.*, (2011) y Alamineh *et al.*, (2018), que si bien, no todos son modelos para estimación de temperaturas horarias, se pueden ajustar para tal propósito.

Los estudios de comparación de modelos para estimación de temperaturas horarias son importantes para la elección del mejor modelo que se ajuste al área de estudio. Saito y Simunek (2009) compararon diferentes modelos de estimación de variables climáticas como temperaturas horarias, velocidad del viento, humedad relativa, entre otras, para cuantificar el impacto de la elección de diferentes métodos de estimación y parametrización en las predicciones de temperatura del suelo, para suelos sin cobertura vegetal, en el Desierto Chihuahua ubicado en Texas. Akinnubi y Adenivi (2017) compararon cinco modelos de estimación de temperaturas horarias a partir de datos diarios de temperatura máxima, mínima y media para un sitio experimental en Nigeria.

México carece de infraestructura para el cálculo directo de hf; los estudios que se realizan para cuantificación y análisis de acumulación de frío para frutales y otros cultivos requieren la implementación de métodos indirectos como la estimación de temperaturas horarias. Algunos otros estudios han analizado los impactos que tendrá el cambio climático en la acumulación de hf para la producción. Por ejemplo, Pérez, (2024), analizó la tendencia de las hf en la zona noroeste del Estado de México encontrando disminución en acumulación de hf para la zona de estudio. Medina-García *et al.* (2019) analizaron la variación histórica de la acumulación de hf con escenarios de cambio climático, determinando que la producción frutal estará comprometida para los próximos años debido al incremento en

la temperatura por cambio climático. Cervantes Herrera *et al.*, (2005), utilizaron los métodos de Da Mota (1957) y Weinberger (1950), el promedio de los resultados de ambos métodos y la altitud de la región sur de Zacatecas, para generar tres modelos de regresión lineal con las hf. Encontrando correlación entre las estimaciones de las hf y la altitud de las diferentes zonas analizadas.

En esta investigación se compararon los modelos propuestos por Parton y Logan (1981); Linvill (1990) y CIBSE (citado en Chow y Levermore, 2007), para estimar temperaturas horarias y cuantificar horas-frío para el municipio de Atltzayanca, Tlaxcala, reconocido por la producción de durazno de la variedad *Prunus persica* y cuya susceptibilidad del fruto a condiciones ambientales como heladas y granizadas, hacen necesario un análisis de hf para la producción de este frutal en el estado, décimo lugar en producción de durazno a nivel nacional y que carece de estudios relacionados con estimaciones de esta naturaleza.

2. Materiales y métodos

2.1 Descripción de la zona de estudio

Atltzayanca, municipio reconocido por producir durazno de la variedad *Prunus persica*, se localiza al norte del estado, entre las coordenadas geográficas 19°26' de latitud Norte y 97°48' de longitud Oeste; con clima semiseco y lluvias en verano, temperatura promedio mínima anual registrada de 6.3°C y máxima de 22.3°C.

2.2 Análisis de calidad de datos y estimación de registros faltantes

Se utilizaron registros de temperatura máxima y mínima diaria de la estación climatológica de Altzayanca Tlaxcala, con número de identificación 29151 de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Se obtuvo información de los periodos invernales del 1 de noviembre de 1985 a 28 de febrero de 2023. Se realizó un análisis de calidad de la información considerando años de 365 días, identificando además datos fuera de rango y registros faltantes. Para la estimación de datos faltantes, se empleó regresión lineal con el periodo de mayor correlación. Se elaboraron gráficos de caja y bigotes, así como de series temporales para identificar tendencias en el comportamiento de la temperatura. Para identificar si existe relación entre el aumento de la temperatura con la presencia de años de NIÑO, en los gráficos de caja y bigotes, se indicaron los periodos que coincidieron con el fenómeno de 'EL NIÑO' (Color rojo), 'LA NIÑA' (color azul) y 'NUETRO' (color gris).

2.3 Modelos de estimación de temperaturas horarias

Para la estimación de temperaturas horarias se aplicaron los modelos propuestos por Parton y Logan (1981), Linvill (1990) y método CIBSE presentado en Chow y Levermore, (2007). Parton y Logan (1981) proponen estimar la temperatura horaria:

$$t_i = \begin{cases} (t_{max} - t_{min}) \sin\left(\frac{\pi m}{Y + 2a}\right) + t_{min} & \text{Desde el amanecer hasta el ocaso} \\ t_{min} + (t_{oc} - t_{min}) e^{\frac{-bn}{z}} & \text{Desde el ocaso hasta el amanecer} \end{cases}$$

Donde:

t_i Representa la temperatura al tiempo i ,
 t_{max} y t_{min} , temperatura máxima y mínima respectivamente,
 t_{oc} , temperatura a la que se oculta el sol,
 m número de horas después de que ocurre la temperatura mínima hasta que se oculta el sol,

n número de horas después de que se oculta el sol hasta que ocurre la temperatura mínima,
 a y b son coeficientes de retraso para la temperatura máxima y de la temperatura de la noche; y
 z coeficiente de retraso para la temperatura mínima

A su vez, Linvill (1990) formuló el modelo:

$$t_i = \begin{cases} (t_{max} - t_{min}) \sin\left(\frac{\pi t}{DL + 4}\right) + t_{min} & \text{Desde el amanecer hasta el ocaso} \\ t_{oc} - \left(\frac{t_{oc} - t_{min}}{\ln(24 - DL)}\right) \ln t & \text{Desde el ocaso hasta el amanecer} \end{cases}$$

Donde:

t_i Representa la temperatura al tiempo i , t_{max} y t_{min} la temperatura máxima y mínima respectivamente, t_{oc} , la temperatura a la que se oculta el sol, DL la longitud del día.

Finalmente, Chow y Levermore (2007) propusieron el modelo:

$$t_i = f_1 t_{min} + f_2 t_{max}$$

$$f_1 = \begin{cases} \frac{\cos\left(\frac{\pi(t_i - i)}{24} + t_{min} - t_{max}\right) + 1}{2}, & i < t_{min} \\ \frac{\cos\left(\frac{\pi(i - t_{min})}{t_{max}} + t_{min}\right) + 1}{2}, & t_{min} < i < t_{max} \\ \frac{\cos\left(\frac{\pi(24 + t_{min} - i)}{24} + t_{min} - t_{max}\right) + 1}{2}, & t_{min} < i \end{cases}$$

$$f_2 = 1 - f_1$$

Donde:

t_i Representa la temperatura al tiempo i , t_{max} y t_{min} , la temperatura máxima y mínima respectivamente, f_1 y f_2 son factores relacionados con la duración de la luz diurna.

temperaturas horarias estimadas, se hizo el cálculo de hf acumuladas.

Todos los análisis y metodologías para estimar temperaturas horarias se implementaron en el software de licencia libre RStudio, versión 2022.02.3 + 492.

2.4 Validación de modelos y cálculo de horas-frío

Los métodos utilizados para estimar temperaturas horarias fueron validados con el cálculo de la raíz del error cuadrado medio (RECM) y mediante un ajuste de regresión de la temperatura horaria estimada y la temperatura horaria registrada con datos horarios registrados del 22 al 27 de febrero de 2022 de la estación climatológica con número de identificación 29030 de CONAGUA ubicada en Tlaxcala. Con las

3. Resultados

La base de datos presentó un 2,9% (125 datos) y „2% (134 datos) de registros perdidos para la temperatura mínima y máxima respectivamente. En los gráficos de series temporales, así como en los diagramas de caja y bigotes de los meses más fríos, la tendencia fue de aumento en la temperatura mínima y máxima, indicando inviernos más cálidos incidiendo en menor acumulación natural de hf (FIGURAS 1 y 2).

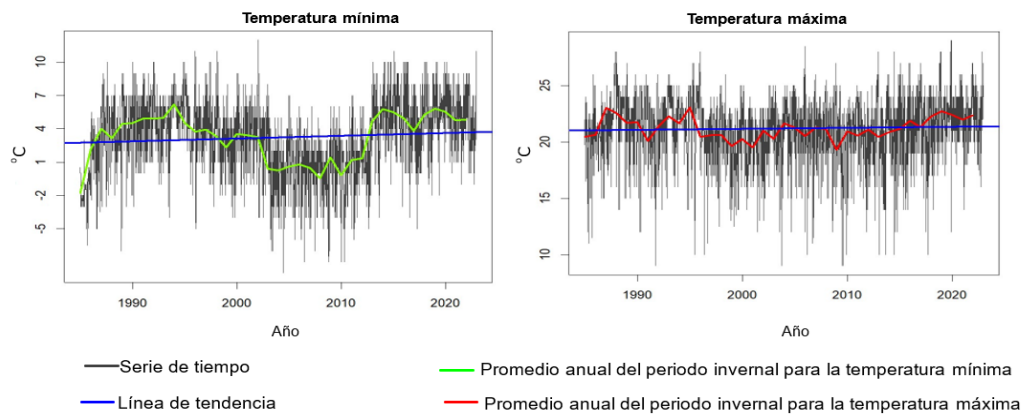


FIGURA 1. Serie de tiempo para la temperatura mínima y máxima. Fuente: elaboración propia

En los 38 periodos invernales analizados, se presentaron 12 de 'NIÑO', 15 de 'NIÑA' y 11 'NEUTROS'. Resalta el incremento en la temperatura mínima que se presenta en los periodos invernales del 2013 a 2022. Para estos periodos, los eventos NEUTROS son: 2013 y 2019 con una anomalía promedio, obtenida por la lista de episodios fríos y cálidos por temporada reportada en NOAA (2024), de 0,075, y el promedio de la temperatura mínima de 3,3°C y 21,7°C para la temperatura máxima. Para los periodos reportados con eventos de 'NIÑA' (2016, 2017, 2020, 2021 y 2022), la anomalía

promedio es de -0,85 con un promedio de 4,9°C y 22,1°C para la temperatura mínima y máxima respectivamente. Finalmente, para los periodos con evento de 'NIÑO' (2014, 2015 y 2018), la anomalía promedio es de 3,9 con un promedio de temperatura mínima de 4,7°C y de 20,8°C para la temperatura máxima. La anomalía promedio de 3,9 para los años 2014, 2015 y 2018, reportados con eventos de 'NIÑO', destacan las temperaturas en el rango de 5 a 10°C para los últimos diez periodos invernales, correspondiente a los años 2013 a 2022 (FIGURA 2).

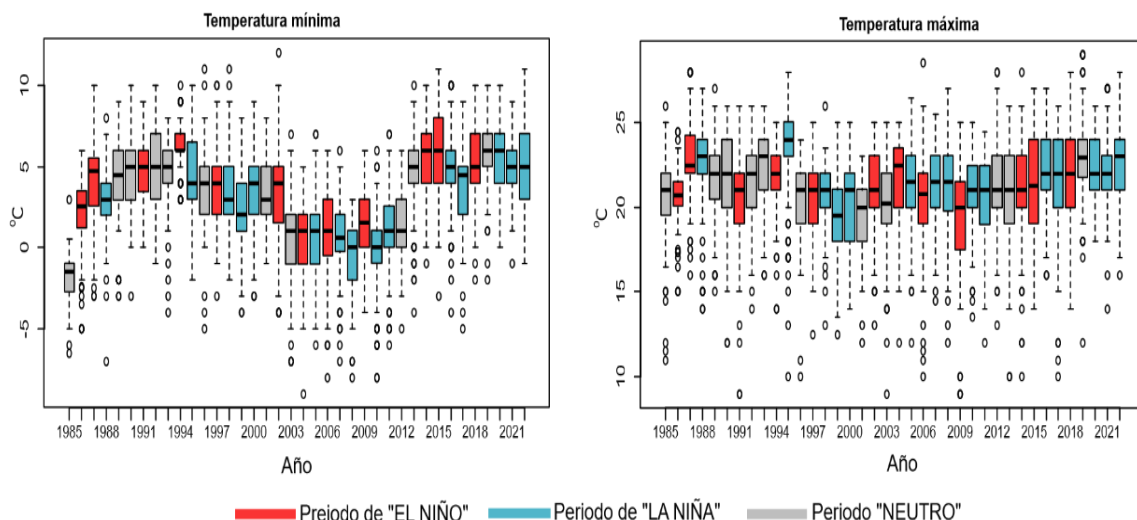


FIGURA 2. Gráficos de caja y bigotes de la temperatura mínima y máxima. Fuente: elaboración propia

3.1 Estimación de temperaturas horarias y validación de los modelos Utilizando los modelos propuestos por Parton y Logan (1981), Linvill (1990) y método CIBSE presentado en Chow y Levermore (2007), se estimaron temperaturas horarias; en el TABLA 1 se presenta la estimación

para el 27 de febrero de 2023, que corresponde al periodo invernal de 2022. La estimación de las temperatura horaria de los últimos seis días del periodo invernal de 2022 (22 a 27 de febrero de 2023) se muestra en la FIGURA 3.

TABLA 1. Temperaturas horarias estimadas del 27 de febrero de 2023. Fuente: elaboración propia

Hora	Método Parton y Logan	Método Linvill	Método CIBSE	Hora	Método Parton y Logan	Método Linvill	Método CIBSE
1	10,76	12,04	9,07	13	26,80	26,40	25,79
2	11,10	11,38	9,30	14	26,96	26,96	27
3	11,50	10,80	9,68	15	26,37	26,81	22,69
4	11,99	10,29	10,20	16	25,04	25,95	21,65
5	12,57	9,83	10,86	17	23,04	24,41	20,55
6	13,26	9,42	11,63	18	20,44	22,25	19,40
7	12,43	10,97	9,00	19	19,48	21,41	18,23
8	15,97	14,50	9,84	20	17,78	19,32	17,05
9	19,20	17,80	21,21	21	16,35	16,64	15,89
10	22,01	20,75	15,67	22	15,16	17,97	14,77
11	22,28	23,22	19,56	23	14,16	13,77	13,70
12	25,90	25,13	23,16	24	13,32	12,82	12,70

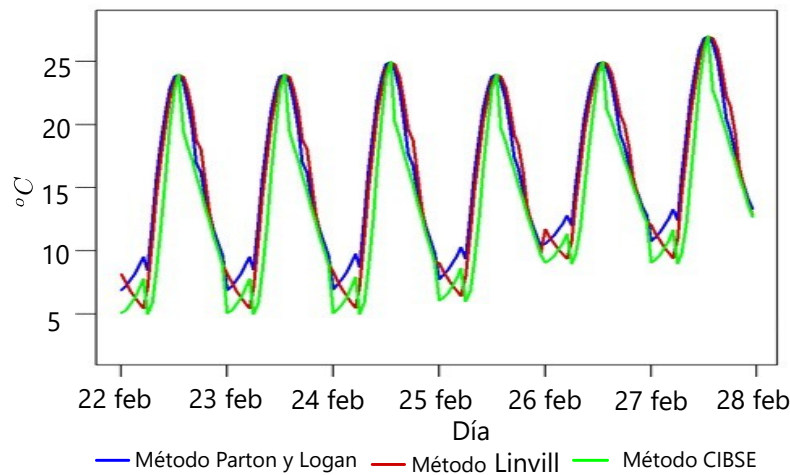


FIGURA 3. Estimación de temperaturas horarias del 22 a 27 de febrero de 2023. Fuente: elaboración propia

La TABLA 2 recoge el registro horario estimado y observado para el 27 de febrero de 2022. A su vez, la FIGURA 4 presenta el gráfico de los datos

horarios estimados y observados del mismo día por los métodos de Parton y Logan, Linvill y CIBSE.

TABLA 2. Estimación de temperaturas horarias del 27 de febrero de 2022. Fuente: elaboración propia

Hora	Temperatura registrada	Método Parton y Logan	Método Linvill	Método CIBSE	Hora	Temperatura registrada	Método Parton y Logan	Método Linvill	Método CIBSE
1	10,7	7,83	9,32	5,88	13	24,2	26,37	25,9	25,20
2	9,5	8,22	8,55	6,15	14	25,5	26,56	26,56	26,6
3	8,9	8,69	7,88	6,59	15	26,1	25,87	26,39	21,62
4	9,3	9,26	7,29	7,19	16	26,6	24,34	25,39	20,42
5	6,1	9,93	6,76	7,95	17	25,9	22,02	23,61	19,14
6	6	10,73	6,28	8,84	18	22,9	19,03	21,11	17,82
7	5,8	9,77	8,08	5,80	19	19,9	17,91	20,15	16,46
8	7,8	13,85	12,15	6,77	20	15,4	15,94	17,74	15,10
9	11,4	17,60	15,96	9,51	21	12,8	14,30	14,63	13,76
10	16,8	20,84	19,37	13,50	22	10,7	12,92	12,71	12,46
11	20,9	23,45	22,24	18	23	11,3	11,76	11,31	11,23
12	23,1	25,32	24,44	22,16	24	10,3	10,79	10,22	10,08

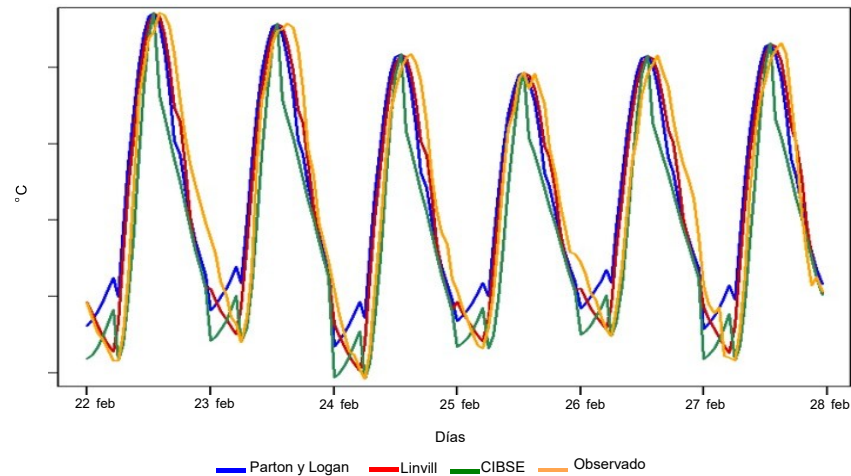


FIGURA 4. Temperatura horaria vs temperatura observada. Fuente: elaboración propia

En la TABLA 3 se presenta la raíz del error cuadrado medio (RECM), así como el coeficiente de correlación (r^2), después del ajuste de regresión entre el valor observado y el valor estimado por cada uno de los métodos aplicados. Finalmente,

en la FIGURA 5, se presenta el gráfico de dispersión entre el valor estimado y el valor observado, así como su correspondiente ajuste a los datos y el menor RECM se obtuvo con el método de Linvill.

TABLA 3. Cálculo de errores. Fuente: elaboración propia

Método	Raíz del error cuadrado medio (RECM)	Coficiente de correlación de Pearson (r^2)
Parton y Logan	2,8	0,79
Linvill	2,30	0,90
CIBSE	2,66	0,87

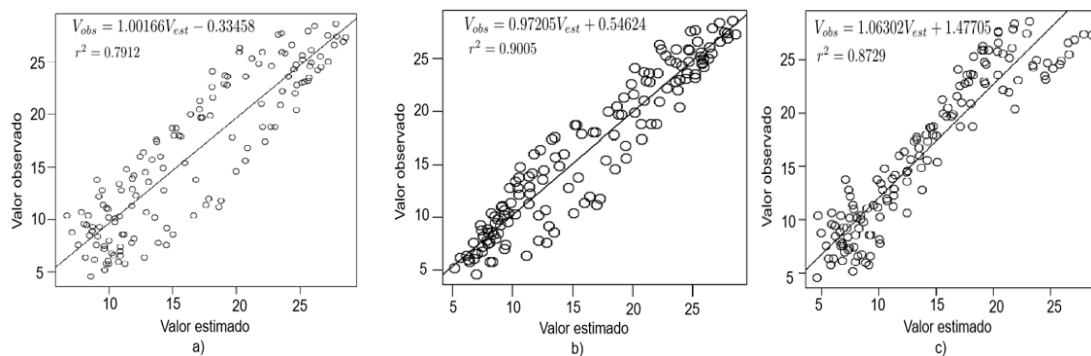


FIGURA 5. Gráfico de valores estimados vs valores observados: a) Método Parton y Logan; b) Método Linvill; c) Método CIBSE. Fuente: elaboración propia

3.2 Estimación de horas-frío por periodo y comparación de metodologías

Para el área de estudio y periodo analizado, los tres modelos analizados coinciden con una

disminución en las hf acumuladas, con una estimación que oscila entre las 330 horas-frío estimadas por Parto y Logan, y 807 horas-frío estimadas por el método CIBSE (TABLA 4 y FIGURA 6).

TABLA 4. Horas-frío estimadas. Fuente: elaboración propia

Año	Método Parton y Logan	Método Linvill	Método CIBSE	Año	Método Parton y Logan	Método Linvill	Método CIBSE
2012	892	1109	1305	2018	287	497	653
2013	376	607	808	2019	154	365	575
2014	248	437	625	2020	226	419	599
2015	325	484	620	2021	331	598	806
2016	308	551	737				
2017	485	798	949				

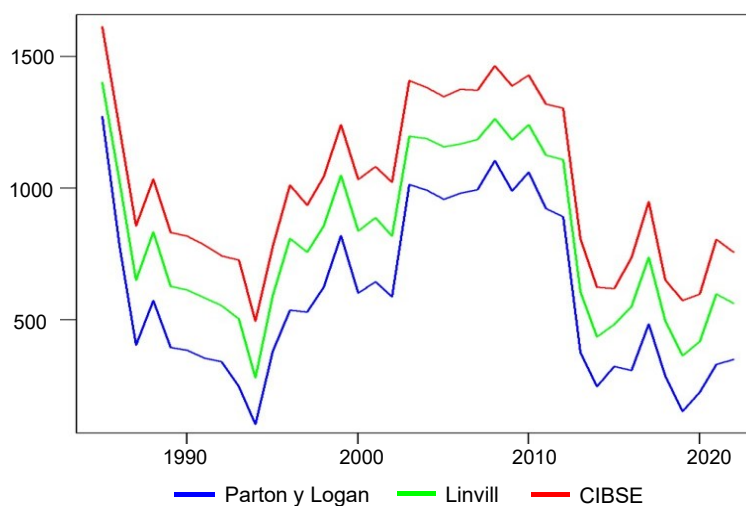


FIGURA 6. Estimación de horas-frío acumuladas por periodo más frío del año. Fuente: elaboración propia

4. Discusión

Los análisis realizados en este estudio indican aumento de la temperatura mínima, y esto tendrá como consecuencia periodos invernales más cálidos y disminución de frío natural acumulado por los frutales, esto coincide con lo reportado por Medina-García *et al.* (2019); Noorazar *et al.* (2020) y Rodríguez *et al.* (2019), quienes estiman un decremento de las hf en los meses de interés, para México, Estados Unidos y España.

Ante la evidencia de un decremento en las hf, tanto por variabilidad natural como por el cambio climático, aquellas variedades de frutales cuyos requerimientos estén por arriba de las 400 hf pueden tener una producción limitada o de mala calidad, lo que representará un problema económico para los productores, ante esto, es importante que los productores consideren introducir variedades de frutales que requieran menos horas-frío. Tharaga *et al.* (2021), enfatiza en el costo sustancial y devastador para los productores de manzana en Ceres Sudáfrica derivado del cambio climático. Los impactos que se tendrán en la producción propiciarán la toma de decisión entre el abandono de la producción o la adaptación a las alteraciones climáticas. Las actividades humanas y, en particular, la producción frutal de zonas templadas será un desafío poniendo en peligro del bienestar humano y la seguridad alimentaria (Salama *et al.*, 2021; Roussos, 2024).

En el ajuste de los modelos se obtuvo un coeficiente de correlación de Pearson de 0.79,

para el modelo de Parton y Logan y de 0.90 para el modelo de Linvill y de 0.89 para el método de CIBSE, aun cuando las mayores diferencias entre el valor observado y el valor estimado, se presenta para las horas desde que se oculta el sol hasta el amanecer, en todos los modelos, esto coincide con lo señalado por Akinnubi y Adenivi (2017) quienes encontraron que la estimación de temperaturas horarias con el modelo de Parton y Logan tienen una desviación alta por las mañanas y las últimas horas de la noche.

5. Conclusión

La acumulación de frío, necesaria para la producción frutal en la zona de estudio, presenta tendencia a una disminución, lo que hasta el momento no representa un peligro para la producción de durazno, debido a que las variedades que se están cultivando en el municipio de Atltzayanca están entre las 280 y 350 hf.

Finalmente, el 50% de la superficie del estado corresponde a la agricultura de temporal, por lo que es importante analizar el comportamiento de las hf por municipio para evaluar la posibilidad de implementar frutales en los metepantles de las zonas agrícolas, como estrategia de garantizar la seguridad alimentaria y de mejora de la economía para los productores agrícolas del estado.

6. Referencias citadas

- ALAMINEH, F. Z.; MEKONNEN, W. T.; TEREFE, Z. T. & M. NIGUSSIE. 2012. "Harmonic analysis of precipitation time series in Lake Tana Basin, Ethiopia". *Advances in Meteorology*, 1-9. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2018/1598195>
- AKINNUBI, R.T. & M. O. ADENIYI. 2017. "Modeling of diurnal pattern of air temperature in a tropical environment: Ile-Ife and Ibadan, Nigeria. Model". *Earth Syst. Environ*, 3: 1.421-1.439.

- CERVANTES HERRERA, J.; LEDESMA MARES, J. C. y C. GALLEGOS V. 2005. "Estimación de horas frío con datos altimétricos, para la región Sur de Zacatecas". *Revista de Geografía Agrícola*, (34): 23-36. Disponible: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=75703403>
- CHOW, D. H. C & G. LEVERMORE J. 2007. "New algorithm for generating hourly temperature values using daily maximum, minimum and average values from climate models". *Building Serv. Eng. Res. Technol*, 28(3): 237-248.
- CROSSA-RAYNAUD, P. 1956. "Effets des hivers doux sur le comportement des arbres fruitiers à feuilles caduques". *Ann. Serv. Bot. Agron*, 29: 1-22.
- DA MOTA, F. S. 1957. "Os invernos de Pelotas, Bs, em relação as exigências das al'vo-es frutíferas de folhas caducas". *Bol. Tec*, 18.
- EPHRATH, J. E.; GOURDRIAN, J. & A. MARANI. 1996. "Modelling diurnal patterns of air temperature, radiation, wind speed and relative humidity by equations from daily characteristics". *Agricultural systems*, 51(4): 377-393.
- FADÓN, E.; HERRERA, S.; GUERRERO, I. B.; GUERRA, M. E. & J. RODRIGO. 2020. "Chilling and heat requirements of temperate stone fruit trees (*Prunus* sp.)". *Agronomy*, 10(3): 409. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/agronomy10030409>
- ISIKUE, B. C.; AGADA, P.O.; UTA, E. U. & F. N. OKEKE. 2011. "Application of harmonic analysis in the preliminary prediction of air temperature over Lagos and Abuja, Nigeria". *International Journal of Environment and Climate Change*, 1(3): 53-65. Disponible en: <https://doi.org/10.9734/BJECC/2011/353>
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE [IPCC]. 2019. Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. pp 4. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- LINVILL, E. D. 1990. "Calculating chilling hours and chill units from daily maximum and minimum temperature observations". *Hortscience*, 25(1): 14-16.
- MEDINA-GARCÍA, G.; GRAJEDA-GRAJEDA, J.; RUIZ-CORRAL, J. A.; CASA-FLORES, J. I.; RODRÍGUEZ-MORENO, V. M. y C. MORA-OROZCO. 2019. "Disminución de las horas frío como efecto del cambio climático en México". *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(6): 1.325-1.337. Disponible en: <https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/agricolas/article/view/1688/2535>
- MENDOZA, G. E. 2020. "Cuantificación y acumulación de horas-frío y días-grado en el valle alto de Cochabamba". *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 17(2): 144-150.

- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). 2024. *National Weather Service*. Climate Prediction Center. Disponible en: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_onitoring/ensostuff/ONI_v5.php
- NOORAZAR, H.; KALCSITS, L.; JONES P., V.; JONES M. S. & K. RAJAGOPALAN. 2020. "The risk for insufficient chill accumulation: a climate change perspective for apple and cherry production in the United States". *BioRxiv*. Disponible en: <https://doi.org/10.1101/2020.08.26.268979>
- PANOFSKY, H. A. & G.W. BRIER. 1968. *Some applications of statistics to meteorology*. Penn. State University, College of Earth and Mineral Sciences, University Park. USA.
- PARTON, W. J. & J.A. LOGAN. 1981. "A model for diurnal variation in soil and air temperature". *Agricultural Meteorology*, 23: 205-216.
- PÉREZ, R. G. 2024. "Trend of cold hours in the northwest of the State of Mexico". *Revista de Geografía Agrícola*, 73: 1-16. Disponible en: <https://doi.org/10.5154/r.rga.2022.73.13>
- RODRÍGUEZ, A.; PÉREZ-LÓPEZ, D.; SÁNCHEZ, E.; CENTENO, A.; GÓMARA, I.; DOSIO, A. & M. RUIZ-RAMOS. 2019. "Chilling accumulation in fruit trees in Spain under climate change". *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 19. Disponible en: <https://doi.org/10.5194/nhess-19-1087-2019>
- ROUSSOS, P. A. 2024. "Climate change challenges in temperate and sub-tropical fruit tree cultivation". *Encyclopedia*, 4: 558-582. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/encyclopedia4010036>
- SAITO, H. & J. SIMUNEK. 2009. "Effects of meteorological models on the solution of the surface energy balance and soil temperature variations in bare soils". *Journal of Hidrology*, 373: 545-561.
- SALAMA, A. M.; EZZAT, A.; EL-RAMADY, H.; ALAM-ELDEIN, S. M.; OKBA, S.; ELMENOFY, H. M.; ... & I. J. HOLB. 2021. "Temperate fruit trees under climate change: Challenges for dormancy and chilling requirements in warm winter regions". *Horticulturae*, 7: 86. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/horticulturae7040086>
- THARAGA, P. C.; STEYN, A. S. & G. M. COETZER. 2021. "Climate change impacts on temperature and chill unit trends for Apple (*Malus domestica*)". *Atmosphere*, 12(6): 740. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/atmos12060740>
- THARAGA, P. C.; STEYN, A. S. & G. M. COETZER. 2016. Impacts of climate change on accumulated chill units at selected fruit production sites in South Africa. *ISHS Acta Horticulturae*, 1130, *Congreso Internacional de Horticultura*. Disponible en: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1130.9>

WEINBERGER, J. H. 1950. "Chilling requirements if peach varieties". *Amer. Soc. For. Hort. Sci. Proc.*, 56: 122-127.

YANG, Q.; GAO, Y.; WU, X.; MORIGUCHI, T.; BAI, S. & W. TENG. 2021 . "Bud endodormancy in deciduous fruit trees: advances and prospects". *Horticulture Research*, 8: 1-39. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41438-021-00575-2>

Lugar y fecha de finalización del artículo:
Tlaxco, Tlaxcala, México; octubre, 2025