

Estimación del Déficit de Presión de Vapor en regiones vitivinícolas en México utilizando modelos climáticos

Lidia Elizabeth Verduzco-Grajeda^{1*}, Arturo Corrales-Suastegui², Edgar G. Pavia³, David Ávalos-Cueva⁴
e Ismael Velázquez⁵

¹Universidad Tecnológica del Norte de Aguascalientes, Dirección de Investigación, Dirección Académica de Negocios y Agricultura, Aguascalientes, Ags., México, lidia.verduzco@utna.edu.mx

²Instituto de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México, corrales.arturo@inifap.gob.mx

³Departamento de Oceanografía Física, Centro de Investigación y de Estudios Superiores de Ensenada, Ensenada, México. epavia@cicese.mx

⁴Departamento de Ingeniería Civil y Topografía, Universidad de Guadalajara, Blvd. Marcelino García Barragán 1421, Guadalajara 44430, Jalisco, Mexico, david.avalos@academicos.udg.mx

⁵Laboratorio de Pronóstico Meteorológico, CICESE, Ensenada, B.C., México, vmendoza@cicese.mx
Autor correspondiente: lidia.verduzco@utna.edu.mx

Resumen

El déficit de presión de vapor (DPV) es un parámetro que relaciona los cambios en temperatura con la demanda evaporativa atmosférica y el estrés hídrico que enfrentan los cultivos, particularmente bajo condiciones de calentamiento climático. En este estudio se analizan los patrones espaciales y estacionales del DPV y de la humedad específica (q) sobre México, con énfasis en las principales regiones vitivinícolas del país. Se utilizó ERA5-Land para caracterizar el periodo de referencia (1995-2014) y el modelo climático global HadGEM3-GC31-MM para estimar cambios hacia finales del siglo XXI (2081-2100) bajo el escenario SSP5-8.5. Los resultados para el periodo de referencia muestran una marcada estacionalidad del DPV, con valores más altos en el noroeste y norte del país y máximos durante primavera y verano. HadGEM3-GC31-MM reproduce de forma general estos patrones, con sesgos de magnitud baja a moderada. Las proyecciones futuras indican un incremento generalizado del DPV, particularmente intenso en Baja California, Sonora y Coahuila, mientras que el Altiplano y el centro-Bajío presentan aumentos más moderados. De manera simultánea, la humedad específica aumenta en todas las estaciones, lo que sugiere que la intensificación del DPV está dominada por el efecto del calentamiento sobre la presión de saturación. Estos resultados apuntan a un aumento de la demanda evaporativa atmosférica hacia finales de siglo, con implicaciones relevantes para la vitivinicultura, incluyendo mayores requerimientos hídricos y un entorno atmosférico más estresante para la vid. El estudio proporciona una base climática regional útil para la evaluación de vulnerabilidad y el diseño de estrategias de adaptación en el sector vitivinícola bajo escenarios de cambio climático.

Palabras clave— Déficit de presión de vapor (DPV); Humedad específica; Cambio climático; Vitivinicultura.

Estimation of Vapor Pressure Deficit in wine-growing regions in Mexico using climate models

Abstract

Vapor pressure deficit (VPD) is a key indicator of atmospheric evaporative demand and plant water stress, particularly under a warming climate. This study analyzes the spatial and seasonal patterns of VPD and specific humidity (q) over Mexico, focusing on the main wine-producing regions. ERA5-Land is used to characterize the reference period (1995-2014), while the global climate model HadGEM3-GC31-MM is employed to assess projected changes by the end of the 21st century (2081-2100) under the high-emissions scenario SSP5-8.5. During the reference period, VPD exhibits a pronounced seasonal cycle, with higher values over northwestern and northern Mexico and maxima during spring and summer. HadGEM3-GC31-MM generally reproduces these spatial and seasonal features, although with smoother fields and low-to-moderate biases. Future projections indicate a widespread increase in VPD, with the strongest signals over Baja California, Sonora, and Coahuila, while more moderate increases are projected over the Mexican Plateau and the central Bajío region. At the same time, specific humidity increases across all seasons, indicating that the projected rise in VPD is primarily driven by thermodynamic warming effects on saturation vapor pressure rather than by reductions in absolute humidity. These results point to a future climate with enhanced atmospheric evaporative demand, with relevant implications for viticulture, including increased irrigation requirements and greater atmospheric stress on grapevines, particularly in northwestern and northern regions. The findings provide a regional climatic baseline and a diagnosis of projected changes that can support vulnerability assessments and the development of adaptation strategies for the wine sector under climate change.

Keywords— Vapor pressure deficit (VPD); Specific humidity; Climate change; Viticulture.

Recibido: 16 de febrero de 2026

Aceptado: 17 de julio de 2026

Publicado: 28 de julio de 2026

I. INTRODUCCIÓN

A escala global, el calentamiento antropogénico no solo incrementa la temperatura media, sino que también intensifica la demanda evaporativa de la atmósfera, con implicaciones directas para la disponibilidad hídrica y el desempeño de la agricultura. En este contexto, el déficit de presión de vapor (DPV; vapour pressure deficit, VPD) es un parámetro importante desde el punto de vista agronómico, ya que determina el “estrés atmosférico”: es decir, cuantifica el gradiente termodinámico que favorece la evaporación y la transpiración de las plantas. En términos físicos, el DPV se define como la diferencia entre la presión de vapor a saturación (controlada por la temperatura) y la presión de vapor real (relacionada con la humedad del aire). En términos aplicados, el valor del DPV dependerá del cultivo evaluado, valores altos suelen asociarse con mayor demanda hídrica y con respuestas fisiológicas que limitan el intercambio gaseoso (p. ej., cierre estomático), afectando productividad y calidad [1].

Diversos trabajos recientes muestran que, bajo escenarios de calentamiento global, se espera un incremento robusto del DPV, aunque con marcada variabilidad regional y estacional asociada a los cambios combinados en temperatura y humedad relativa [2-4]. Desde un punto de vista termodinámico, el aumento de la temperatura eleva la presión de vapor de saturación, de modo que, aun cuando la humedad relativa no disminuya de forma sustantiva, el DPV puede intensificarse. Un análisis basado en modelos del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 6 (CMIP6) documenta que el rango de cambio proyectado del DPV hacia finales de siglo depende fuertemente de la estación y de la región, lo que subraya la necesidad de diagnósticos regionales que distingan tanto la señal media como su estructura estacional [3].

En paralelo, se han propuesto productos y metodologías para caracterizar el DPV a mayor resolución espacial mediante la integración de observaciones in situ, sensores remotos y aprendizaje automático, lo cual refleja el creciente interés en el DPV como variable operativa para hidrología, agricultura y evaluación de riesgos climáticos. Por ejemplo, enfoques de remuestreo (downscaling) basados en modelos de aprendizaje automático y predictores multifuente han mostrado mejoras sustantivas en la representación espaciotemporal del DPV con respecto a campos de reanálisis de resolución más gruesa, aumentando su utilidad para aplicaciones territoriales y sectoriales [5].

En vitivinicultura, la sensibilidad del cultivo al clima es particularmente alta porque el rendimiento y la calidad dependen de umbrales térmicos, disponibilidad de agua y condiciones atmosféricas durante etapas fenológicas clave [6]. La intensificación del DPV puede traducirse en un entorno atmosférico más demandante para la vid, con implicaciones para la transpiración, el balance hídrico del viñedo y el manejo del riego, especialmente cuando coexiste con olas de calor. A escala global, se ha documentado que el cambio climático puede modificar la idoneidad climática y redistribuir regiones aptas para la producción, con implicaciones sobre recursos hídricos y sistemas de conservación en paisajes vitícolas [7].

Asimismo, estudios enfocados en la fisiología y composición de la uva señalan que la adaptación en viñedo y la elección de material vegetal serán clave para sostener calidad y tipicidad en condiciones futuras más cálidas y secas [8]. Este estudio adquiere especial relevancia en México debido a que las principales regiones vitivinícolas se localizan en zonas áridas y semiáridas, donde la disponibilidad de agua constituye un factor estratégico para la sostenibilidad de la producción. Además, estas regiones concentran cerca del 97 % de la producción nacional de uva para uso industrial [9], por lo que los cambios en las condiciones atmosféricas asociadas al DPV podrían tener repercusiones no solo sobre la actividad agrícola, sino también sobre la competitividad y el desarrollo económico regional. En este sentido, comprender la variabilidad y evolución de esta variable climática representa un elemento clave para la planificación y adaptación del sector vitivinícola ante escenarios de cambio climático [1,7,8].

En México, la producción vitivinícola destinada a aplicaciones industriales (vino, mosto y vinagre) se concentra en regiones del noroeste, norte y centro-norte, por lo que resulta fundamental cuantificar la posible evolución del DPV, dada su estrecha relación con la demanda evaporativa y, por extensión, con los requerimientos hídricos y estrés fisiológico de la vid. Este estudio se centra en los principales estados productores: Baja California, Sonora, Coahuila, Zacatecas, Aguascalientes, Guanajuato y Querétaro [9]. Con base en lo anterior, se caracterizan el DPV y la humedad específica (q) en el periodo de referencia (1995-2014) utilizando un reanálisis orientado a aplicaciones terrestres (ERA5-Land; [10]) y se estiman sus cambios hacia finales del siglo XXI (2081-2100) bajo el escenario SSP5-8.5 mediante un modelo climático global. Adicionalmente, se presenta un diagnóstico del sesgo climatológico del modelo respecto a ERA5-Land en el periodo de referencia, con el fin de contextualizar la interpretación de los cambios proyectados.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Área de estudio

Este estudio se enfoca en los principales estados productores de vid para vino, los cuales incluyen a Baja California, Sonora, Coahuila, Zacatecas, Aguascalientes, Guanajuato y Querétaro, como se muestra en la Fig. 1. De acuerdo con el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), en 2023 estos estados aportaron en conjunto cerca del 97% de la producción nacional de uva destinada a uso industrial (vino, mosto y vinagre), como se muestra en la Tabla 1.

TABLA 1
PRODUCCIÓN DE UVA INDUSTRIAL (UVA PARA VINO) POR ENTIDAD
FEDERATIVA EN MÉXICO (TONELADAS), 2023 [9].

Estado	Producción 2023 (t)	% del total nacional (77,107 t)
Zacatecas	29436	38.18%
Baja California	24208	31.40%
Aguascalientes	7256	9.41%
Guanajuato	4404	5.71%
Coahuila	3998	5.19%
Querétaro	3876	5.03%
Sonora	1738	2.25%

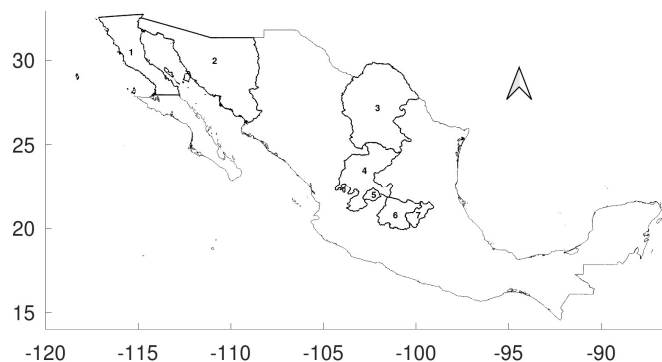


Fig. 1. México y región de estudio compuesta por los estados Baja California (1), Sonora (2), Coahuila (3), Zacatecas (4), Aguascalientes (5), Guanajuato (6) y Querétaro (7). La flecha indica el norte.

El análisis espacial se realizó sobre la región de estudio completa, definida por los polígonos estatales de Baja California, Sonora, Coahuila, Zacatecas, Aguascalientes, Guanajuato y Querétaro. Por lo tanto, los resultados representan una caracterización climática regional de las principales entidades productoras de uva para uso industrial, y no una evaluación estadística independiente para cada estado, zona vitivinícola específica o viñedo particular. Lo anterior responde al objetivo del estudio y a la resolución espacial de los datos climáticos utilizados, la cual podría limitar la representación detallada de la variabilidad microclimática local dentro de cada entidad.

B. Datos

En este estudio, se utilizaron datos mensuales de temperatura del aire y temperatura del punto de rocío a partir de ERA5-Land. Esta base de datos es un producto de reanálisis global orientado a aplicaciones terrestres, desarrollado por el ECMWF en el marco del Copernicus Climate Change Service (C3S), como una versión refinada del componente de superficie terrestre de ERA5. El conjunto de datos proporciona una descripción físicamente consistente de la evolución de los ciclos de agua y energía sobre los continentes a lo largo de un periodo extendido (desde 1950 hasta la actualidad, con actualizaciones continuas), lo que lo hace adecuado para el análisis de tendencias y anomalías.

Para su generación se emplean integraciones numéricas globales de alta resolución del modelo de superficie terrestre del ECMWF, forzadas con variables meteorológicas de ERA5 previamente desescaladas a mayor resolución e incorporando correcciones por elevación en el estado termodinámico cercano a la superficie. En comparación con ERA5 y ERA-Interim, una mejora clave es la resolución horizontal (~9 km), manteniendo resolución temporal horaria, con beneficios reportados en la representación del ciclo hidrológico. ERA5-Land constituye una base robusta para estudios ambientales, así como para la inicialización de modelos de previsión numérica del tiempo y climáticos [10]. ERA5-Land se encuentra disponible en: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets>.

Por otra parte, se utilizaron promedios mensuales de temperatura del aire a 2 m (tas), humedad específica (huss) y humedad relativa (hurs) del Modelo de Circulación General

HadGEM3-GC31-MM (GCM; HadGEM en adelante), obtenidos mediante la agregación de los datos diarios.

HadGEM es una configuración acoplada del sistema climático del Met Office Hadley Centre utilizada en CMIP6, con resolución atmosférica nominal N216 (~60 km en latitudes medias) y malla oceánica ORCA025 (~0.25°), lo que favorece una representación más realista de la circulación regional y de parte de la variabilidad asociada a la mesoescala oceánica frente a configuraciones más gruesas. El sistema integra los componentes GA7.1 (atmósfera), JULES/GL7.1 (superficie terrestre), NEMO/GO6.0 (océano) y CICE/GSI8 (hielo marino), además de un esquema de aerosoles (UKCA-GLOMAP-mode), dentro de una configuración acoplada de referencia para experimentos de intercomparación [11].

Los datos de HadGEM se obtuvieron a través de NEX-GDDP-CMIP6 (NASA, disponibles en <https://www.nccs.nasa.gov/services/data-collections/land-based-products/nex-gddp-cmip6>), un producto que proporciona proyecciones climáticas globales sesgo-correctas y desescaladas a 0.25° con resolución diaria, derivadas de simulaciones CMIP6 y disponibles para los cuatro escenarios SSP, lo que facilita aplicaciones y estudios de impacto que requieren mayor detalle espacial que el de los GCMs originales [12].

Siguiendo la recomendación del IPCC para el AR6, y de manera similar a [13]-[15], se definió el periodo 1995-2014 como periodo de referencia para las “condiciones actuales” y el periodo 2081-2100 para las “condiciones futuras” bajo el escenario SSP5-8.5.

C. Déficit de presión de vapor

El déficit de presión de vapor (DPV) se estimó usando la siguiente expresión y similar a [5]:

$$DPV = es(T) - e \quad (1)$$

$es(T)$ y e vienen dadas por las ecuaciones (2) y (3), respectivamente:

$$es(T) = 0.611 * e^{\frac{17.27 * T}{T_a + 237.5}} \quad (2)$$

$$e = \frac{RH}{100} * es(T) \quad (3)$$

Donde $es(T)$ es la presión de saturación de vapor (kPa) a una temperatura T , e es la presión del vapor de agua en kPa, T_a es la temperatura del aire en grados Celsius (°C) y RH es la humedad relativa en por ciento (%). Las unidades del DPV en la ecuación (1) son kPa.

El DPV se calculó a partir de los datos obtenidos de promedios mensuales de temperatura del aire a 2 m (tas) y la humedad relativa (hurs) para el conjunto de simulaciones HadGEM, tanto en el periodo de referencia como en el futuro. En este caso, la humedad relativa (RH) está disponible de manera directa y se utiliza para estimar la presión real de vapor mediante la ecuación (3).

En contraste, en ERA5-Land la humedad relativa a 2 m y la humedad específica no se encuentran disponible como variables estándar en el conjunto de datos empleados; sin embargo, ERA5-Land sí proporciona la temperatura del punto de rocío (T_d) y la temperatura del aire (T_a) a 2 m. Por ello, la humedad relativa (RH, en adelante) se estimó a partir de T_d y T_a mediante la relación entre la presión de vapor de saturación a la temperatura del punto de rocío y la presión de vapor de saturación a la temperatura del aire (ecuación 4). Posteriormente se utilizó dicha RH estimada para calcular la presión real de vapor e (ecuación 3) y el DPV (ecuación 1).

$$RH = 100 * \frac{es(T_d)}{es(T_a)} \quad (4)$$

En la ecuación (4), T_d y T_a están dadas en °C, y $es(T)$ se calcula mediante la ecuación (2).

Por otra parte, la humedad específica para ERA5-Land se estimó a partir de la siguiente expresión:

$$q = \left(\frac{0.622 * e * 1000}{(sp - (0.378 * (e * 1000)))} \right) \quad (5)$$

Donde, q es la humedad específica en kg/kg, sp es la presión atmosférica en superficie en Pa y e la presión de vapor de agua kPa obtenida a partir de la ecuación 3.

No se aplicó corrección por sesgo (p. ej., el método delta), ya que el objetivo es caracterizar patrones y magnitudes del cambio bajo el escenario SSP5-8.5 utilizando salidas crudas del modelo. No obstante, se presenta el sesgo climatológico del modelo HadGEM respecto a ERA5-Land en el periodo de referencia.

Para estimar los sesgos y las métricas de evaluación, ERA5-Land se remalló a la resolución espacial de HadGEM. El sesgo medio, la raíz del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) y la correlación espacial se calcularon utilizando únicamente los puntos de malla contenidos dentro de la región de estudio. Las climatologías se presentan en la resolución nativa de cada conjunto de datos.

III. RESULTADOS

A. Periodo de referencia

Las Fig. 2 a 5 muestran los resultados del periodo de referencia (1995-2014). En la Fig. 2 se muestra el DPV medio durante 1995-2014 estimado con (a) ERA5-Land, (b) HadGEM y (c) el sesgo (HadGEM - ERA5-Land), en kPa. En la región de estudio (Baja California, Sonora, Coahuila, Zacatecas, Aguascalientes, Guanajuato y Querétaro), ERA5-Land, ver Fig. 2a, indica los mayores valores de DPV en Baja California y Sonora ($\approx 2-3$ kPa en amplias zonas), valores altos a moderados en Coahuila ($\approx 1.5-2.5$ kPa), valores intermedios en Zacatecas ($\approx 1.2-2.0$ kPa) y valores moderados en la región centro-Bajío (Aguascalientes, Guanajuato y Querétaro; $\approx 0.8-1.6$ kPa).

HadGEM, ver Fig. 2b, reproduce de forma general el patrón observado en ERA5-Land dentro de la zona de estudio, manteniendo DPV alto en Baja California y Sonora y valores

moderados en Zacatecas, Aguascalientes, Guanajuato y Querétaro, aunque con un campo más homogéneo espacialmente. El sesgo en los estados de interés es, como se muestra en la Fig. 2c, de magnitud baja a moderada y espacialmente heterogéneo: se observan alternancias de sobre- y subestimación en Baja California y Sonora, mientras que en Zacatecas, Aguascalientes, Guanajuato y Querétaro predominan sesgos cercanos a cero o de pequeña magnitud; Coahuila presenta sesgos variables, pero mayormente dentro de un rango moderado.

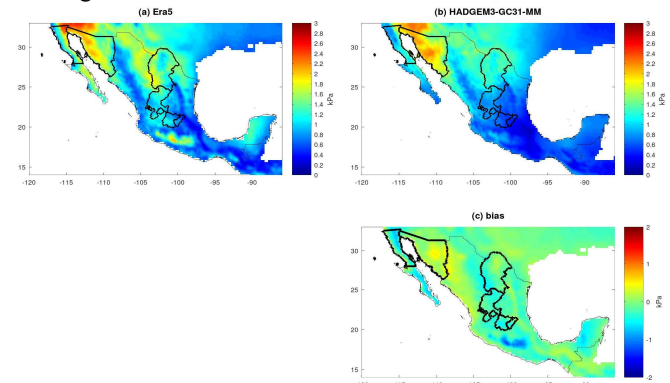


Fig. 2. DPV promedio durante 1995-2014 a partir de (a) ERA5-Land, (b) HadGEM y (c) la diferencia entre HadGEM y ERA5-Land. Las unidades son kPa.

En la Fig. 3 se muestra la humedad específica media (q) durante 1995-2014 a partir de (a) ERA5-Land, (b) HadGEM y (c) el sesgo definido como la diferencia entre HadGEM y ERA5-Land, en kg/kg. En los estados de estudio (Baja California, Sonora, Coahuila, Zacatecas, Aguascalientes, Guanajuato y Querétaro), ERA5-Land, ver Fig. 3a, presenta q baja en el noroeste/norte, con valores típicos de $\sim 0.003-0.008$ kg/kg en Baja California, Sonora y Coahuila, mientras que en el Altiplano y centro-Bajío (Zacatecas, Aguascalientes, Guanajuato y Querétaro) predominan valores moderados, en general $\sim 0.006-0.012$ kg/kg, con variabilidad regional.

HadGEM, como se indica en la Fig. 3b, reproduce de forma general el patrón observado en ERA5-Land dentro de la zona de estudio, manteniendo q relativamente baja en Baja California, Sonora y Coahuila; y moderada en Zacatecas y el centro-Bajío, aunque con un campo más homogéneo espacialmente. El sesgo, como se muestra en la Fig. 3c, es principalmente positivo en los estados de interés, sugiriendo una sobreestimación de q por HadGEM; en términos de magnitud, el sesgo se mantiene típicamente entre ~ 0.001 y 0.006 kg/kg, con áreas localizadas cercanas a cero y máximos regionales puntuales dentro del rango superior.

En conjunto con la Fig. 2, los estados con DPV más alto (principalmente Baja California y Sonora, y en menor medida Coahuila) coinciden con q relativamente baja, mientras que en el Altiplano y centro-Bajío (Zacatecas, Aguascalientes, Guanajuato y Querétaro) predominan valores moderados de ambas variables. Además, el sesgo de q es mayormente positivo en la zona de estudio, ver Fig. 3c, a diferencia del sesgo de DPV, que es más heterogéneo, como se encontró en la Fig. 2c.

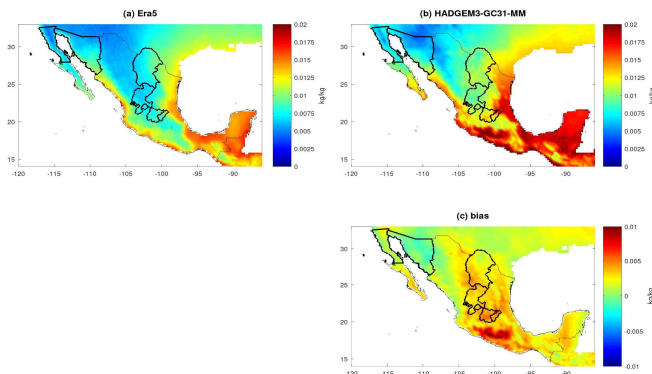


Fig. 3. Humedad específica promedio durante 1995-2014 a partir de (a) ERA5-Land, (b) HadGEM y (c) la diferencia entre HadGEM y ERA5-Land. Las unidades son kg/kg.

En la Fig. 4 se muestra la climatología estacional del DPV durante 1995-2014 a partir de ERA5-Land (a-d), HadGEM3-GC31-MM (e-h) y el sesgo (HadGEM - ERA5-Land) (i-l), en kPa. En ERA5-Land, ver Fig. 4a-d, el DPV presenta una estacionalidad marcada, con mínimos en DJF, máximos en MAM (~2-3 kPa en el noroeste/norte, destacando Baja California y Sonora) y valores intermedios en JJA y SON, manteniendo el contraste espacial entre el noroeste y el centro-sur. HadGEM, ver Fig. 4e-h, reproduce de forma general esta evolución estacional y el patrón espacial dentro de la zona de estudio, aunque con campos más homogéneos. El sesgo, ver Fig. 4i-l, es bajo a moderado y espacialmente heterogéneo (típicamente dentro de ± 1 kPa), con alternancias de sobre- y subestimación en Baja California y Sonora, mientras que en Zacatecas, Aguascalientes, Guanajuato y Querétaro predominan sesgos cercanos a cero o de menor magnitud; Coahuila presenta sesgos variables, pero en general moderados.

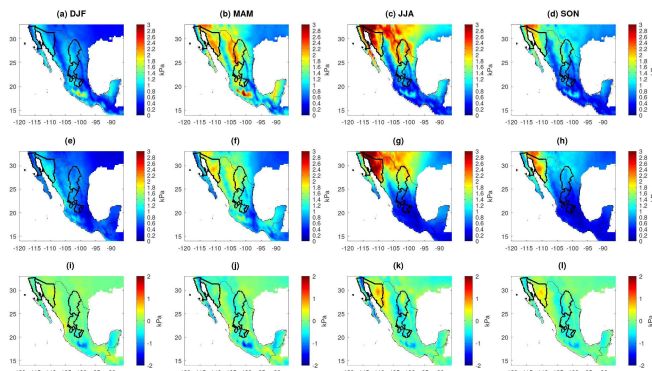


Fig. 4. DPV promedio estacional durante 1995-2014 a partir de ERA5-Land para (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA y (d) SON. (e) - (h) similar a (a) - (d) pero para HadGEM. La diferencia entre HadGEM y ERA5-Land para (i) DJF, (j) MAM, (k) JJA y (l) SON. Las unidades son kPa.

En la Fig. 5 se muestra la climatología estacional de la humedad específica (q) durante 1995-2014 a partir de ERA5-Land (a-d), HadGEM (e-h) y el sesgo (i-l), en kg/kg. En ERA5-Land, ver Fig. 5a-d, q presenta una estacionalidad marcada, con mínimos en DJF y MAM sobre el noroeste y norte, y un máximo en JJA, cuando se incrementan los valores sobre gran parte del país. En la zona de estudio, Baja California, Sonora y Coahuila muestran valores relativamente bajos en la mayor parte del año (≈ 0.002 - 0.008 kg/kg en DJF-MAM), mientras que

Zacatecas, Aguascalientes, Guanajuato y Querétaro presentan valores moderados, con aumentos más notorios en JJA (≈ 0.010 - 0.016 kg/kg).

HadGEM, ver Fig. 5e-h, reproduce de forma general el patrón estacional de ERA5-Land dentro de la zona de estudio, aunque con un campo más homogéneo. El sesgo, ver Fig. 5i-l, es predominantemente positivo en los estados de interés, indicando una sobreestimación de q por HadGEM respecto a ERA5-Land; la magnitud del sesgo es en general baja a moderada (generalmente de ~ 0.001 a 0.006 kg/kg), con variabilidad espacial y áreas localizadas cercanas a cero, particularmente hacia el noroeste.

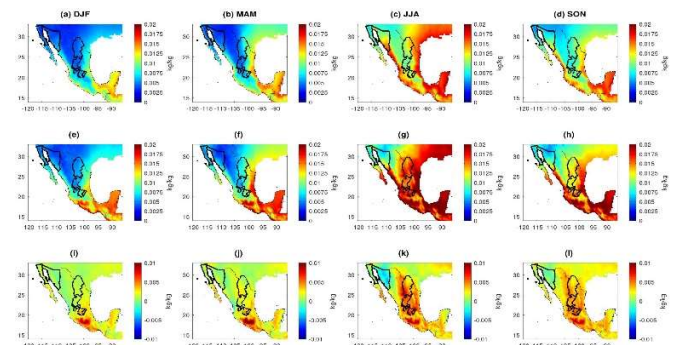


Fig. 5. Humedad específica promedio estacional durante 1995-2014 a partir de ERA5-Land para (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA y (d) SON. (e) - (h) similar a (a) - (d) pero para HadGEM. La diferencia entre HadGEM y ERA5-Land para (i) DJF, (j) MAM, (k) JJA y (l) SON. Las unidades son kg/kg.

Como complemento al análisis espacial de los sesgos, se calcularon el sesgo medio, el RMSE y la correlación espacial entre HadGEM y ERA5-Land en la región de estudio, como se muestra en la Tabla 2. Para el DPV, HadGEM presenta un sesgo medio negativo en todos los periodos, con valores entre -0.031 y -0.204 kPa, lo que indica una ligera subestimación promedio respecto a ERA5-Land. Las correlaciones espaciales son positivas y moderadas a altas, particularmente en MAM, JJA y SON. Para q, el sesgo medio es positivo en todos los periodos (0.0010 - 0.0022 kg/kg), confirmando una ligera sobreestimación promedio de la humedad específica por HadGEM; sin embargo, la correlación espacial disminuye en JJA, lo que sugiere mayor diferencia en la distribución espacial de q durante esa estación.

TABLA 2
MÉTRICAS ESTADÍSTICAS DE EVALUACIÓN DE HADGEM RESPECTO A ERA5-LAND EN LA REGIÓN DE ESTUDIO DURANTE 1995-2014

Variable	Periodo	Sesgo medio	RMSE	r espacial
DPV	Anual	-0.090	0.339	0.767
DPV	DFJ	-0.031	0.167	0.602
DPV	MAM	-0.204	0.303	0.818
DPV	JJA	-0.058	0.527	0.812
DPV	SON	-0.062	0.358	0.834
q	Anual	0.0015	0.0025	0.6261
q	DFJ	0.0009	0.0013	0.7943
q	MAM	0.0013	0.0018	0.8187
q	JJA	0.0016	0.0040	0.2885
q	SON	0.0021	0.0030	0.6027

El sesgo medio y el RMSE se expresan en kPa para DPV y en kg/kg para q; r espacial es adimensional.

B. Futuro

En la Fig. 6 se muestra el cambio futuro para el déficit de presión de vapor (DPV) y la humedad específica (q), definidos como $\Delta DPV = DPV_{\text{futuro}} - DPV_{\text{referencia}}$ y $\Delta q = q_{\text{futuro}} - q_{\text{referencia}}$. Los cambios corresponden a la diferencia entre las climatologías medias anuales de los periodos 2081-2100 y 1995-2014, bajo el escenario SSP5-8.5.

Se encontró para el DPV, como se muestra en la Fig. 6a, un incremento generalizado sobre México, con máximos en el noroeste y norte. Entre los estados resaltados, Sonora y Baja California presentan aumentos altos (del orden de ~ 0.6 - 1.0 kPa), mientras que Coahuila muestra incrementos moderados a altos. En el Altiplano y centro-norte, Zacatecas registra incrementos moderados, y en la región de Aguascalientes, Guanajuato y Querétaro predominan aumentos moderados (~ 0.3 - 0.6 kPa), con variabilidad espacial asociada al relieve.

Para la humedad específica, ver Fig. 6b, se encontró un incremento positivo en la mayor parte del país, con valores más altos hacia zonas costeras y más bajos en el interior. En los estados de Sonora y Coahuila se proyectan incrementos moderados a relativamente altos (principalmente ~ 0.003 - 0.004 kg/kg), mientras que Zacatecas, Aguascalientes, Guanajuato y Querétaro presentan incrementos moderados (~ 0.002 - 0.0035 kg/kg). Baja California presenta incrementos positivos en general, con un gradiente espacial que refleja su fuerte contraste costa-interior.

En conjunto, regiones en donde Δq es positivo con incrementos robustos de ΔDPV indica que, aunque el aire futuro contiene más vapor de agua, el aumento de la temperatura del aire eleva más rápidamente la presión de saturación, intensificando la demanda evaporativa atmosférica. Este efecto es particularmente marcado en Baja California y Sonora, y se mantiene de forma consistente en Coahuila, Zacatecas, Aguascalientes, Guanajuato y Querétaro, lo que es relevante para evaluar el estrés atmosférico sobre cultivos y el potencial aumento de la demanda hídrica en estas regiones.

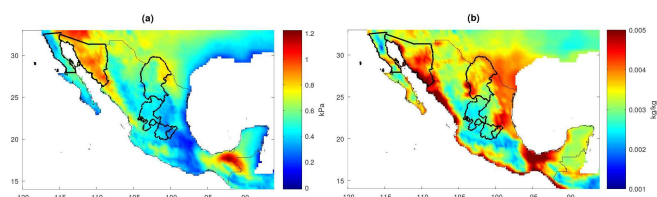


Fig. 6. Cambio medio (2081-2100 respecto a 1995-2014) de (a) déficit de presión de vapor, DPV (kPa), y (b) humedad específica, q (kg/kg).

En la Fig. 7 se encontró que el ΔDPV , ver Fig. 7a-d, es predominantemente positivo en las cuatro estaciones, con incrementos más intensos en MAM y JJA; en la zona de estudio, los mayores aumentos se concentran en el noroeste/norte, destacando Baja California y Sonora (del orden de ~ 1 - 2 kPa), mientras que Coahuila muestra incrementos consistentes de magnitud moderada a alta. En Zacatecas, Aguascalientes, Guanajuato y Querétaro los cambios son en general más moderados, y durante JJA se proyecta una atenuación de la señal (valores cercanos a cero o incrementos pequeños) respecto a MAM. Por otra parte, el Δq , ver Fig. 7e-h, es positivo en toda la zona de estudio, con cambio positivo de ~ 0.002 - 0.010

kg/kg y un cambio más marcado en JJA y SON; Baja California, Sonora y Coahuila presentan aumentos moderados a altos, mientras que Zacatecas, Aguascalientes, Guanajuato y Querétaro muestran incrementos moderados.

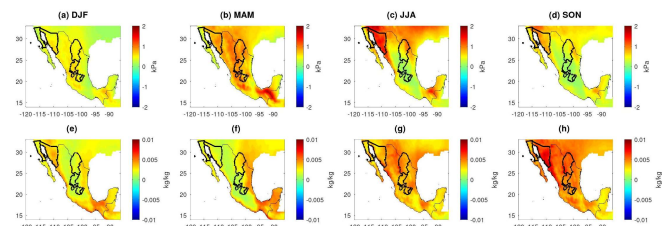


Fig. 7. Cambio medio estacional (2081-2100 respecto a 1995-2014) del déficit de presión de vapor, ΔDPV (kPa), para (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA y (d) SON. (e-h) similar a (a-d) pero para humedad específica, Δq (kg/kg).

IV. DISCUSIÓN

En el periodo de referencia (1995-2014), los patrones espaciales y estacionales son consistentes con el control termodinámico del DPV por la temperatura y la humedad atmosférica: el DPV tiende a maximizarse durante las estaciones más cálidas y secas, cuando la demanda evaporativa es mayor. En este marco, la identificación de máximos en MAM y valores relativamente altos en el noroeste/norte es coherente con la literatura que reconoce al DPV como un indicador operativo de sequía impulsada por demanda atmosférica y de impactos biofísicos asociados [1]. Asimismo, el hecho de que HadGEM reproduzca los gradientes y la estacionalidad de manera general, aunque con campos más homogéneos, sugiere que el modelo captura la señal de gran escala relevante para el diagnóstico regional. No obstante, los sesgos encontrados (en particular el sesgo positivo de q) deben considerarse al interpretar magnitudes locales, sobre todo en zonas con contrastes costa-interior y fuerte influencia orográfica.

Hacia finales de siglo (2081-2100 respecto a 1995-2014) bajo SSP5-8.5, la señal conjunta de incremento de DPV y q refuerza la idea de una atmósfera más demandante: aun cuando el contenido de vapor aumente, el calentamiento eleva con mayor rapidez la presión de saturación y, por tanto, intensifica el gradiente evaporativo. Este comportamiento concuerda con evaluaciones basadas en ensambles CMIP6, que muestran incrementos robustos del DPV y una marcada dependencia regional y estacional asociada a cambios combinados en temperatura y humedad relativa [3]. En este estudio, la intensificación proyectada es particularmente evidente en el noroeste y norte, mientras que el centro-Bajío muestra aumentos moderados; esta estructura espacial es consistente con la mayor sensibilidad de regiones cálidas/semiáridas a incrementos del DPV bajo forzamientos fuertes. Dado que el análisis se basa en un solo GCM y en el escenario SSP5-8.5, los resultados deben interpretarse como una caracterización regional bajo un escenario de altas emisiones, y no como una estimación probabilística de la evolución futura del DPV y la humedad específica. Por lo tanto, los cambios proyectados no representan el rango completo de incertidumbre asociado con la dispersión entre modelos ni con diferentes escenarios de forzamiento, aspecto particularmente relevante para el DPV debido a su dependencia regional y estacional [3]. Estudios

posteriores podrían ampliar este análisis mediante ensambles multi-modelo y escenarios adicionales, con el fin de evaluar la robustez de la señal y acotar la incertidumbre climática regional.

Bajo este contexto, los incrementos de DPV proyectados para finales de siglo durante primavera (MAM), particularmente en Baja California, Sonora y Coahuila, sugieren condiciones atmosféricas más demandantes durante las etapas de brotación, crecimiento vegetativo, floración y cuajado, consideradas críticas para la definición del rendimiento y calidad de la uva. Un DPV más elevado durante estos periodos puede incrementar la transpiración y limitar el desarrollo reproductivo de la vid [6,8], favoreciendo menores tasas de cuajado, reducción en el número y tamaño de las bayas, así como una aceleración de los procesos de maduración en etapas posteriores. Debido a que estas regiones concentran una proporción importante de la producción nacional de uva para uso industrial [9], los efectos potenciales del incremento del DPV podrían extenderse más allá del viñedo, incrementando los costos asociados al manejo hídrico y afectando la rentabilidad y competitividad de la actividad vitivinícola regional.

Para el sector vitivinícola, un DPV futuro más alto implica un entorno con mayor demanda evaporativa, y potencialmente mayores requerimientos de riego, mayor frecuencia de estrés hídrico, especialmente cuando los incrementos coinciden con etapas fenológicas sensibles. Los resultados proyectan los aumentos más intensos en Baja California, Sonora y Coahuila, por lo que estas regiones requerirían estrategias prioritarias como riego deficitario controlado, monitoreo del estado hídrico, sombreado parcial, manejo de dosel y portainjertos tolerantes a sequía. En Zacatecas, Aguascalientes, Guanajuato y Querétaro, donde el incremento del DPV es más moderado, las acciones podrían enfocarse en optimizar la eficiencia del riego, conservar humedad del suelo y ajustar variedades según la disponibilidad hídrica. La evidencia disponible indica que el cambio climático puede modificar la idoneidad climática para la vid, adelantar la fenología e intensificar presiones hídricas [7,8]. En términos de calidad, un DPV elevado podría acelerar la maduración, aumentar azúcares y grado alcohólico, pero reducir acidez y alterar el equilibrio aromático y fenólico de la uva [8]. Bajo este escenario, México podría desarrollar nuevas zonas vitícolas en áreas de mayor altitud o menor demanda evaporativa, en concordancia con los desplazamientos climáticos proyectados para la vitivinicultura mundial [7]. Finalmente, dado que las decisiones de manejo requieren escalas más finas que las de un GCM, la regionalización y el uso de predictores multifuente pueden mejorar la representación espaciotemporal del DPV y fortalecer su aplicabilidad sectorial [5]

V. CONCLUSIÓN

Este estudio caracteriza de manera integral el déficit de presión de vapor (DPV) y la humedad específica (q) sobre México, con énfasis en las principales regiones vitivinícolas, combinando un análisis del periodo de referencia (1995-2014) y proyecciones hacia finales del siglo XXI bajo un escenario de altas emisiones (SSP5-8.5). Los resultados del periodo histórico muestran una marcada estructura espacial y estacional del DPV,

con valores más altos en el noroeste y norte del país y máximos estacionales durante primavera y verano, en concordancia con el régimen térmico y de humedad característico de estas regiones. El modelo HadGEM reproduce de forma general estos patrones, aunque con campos más homogéneos y sesgos de magnitud baja a moderada, lo que proporciona un marco adecuado para interpretar los cambios proyectados.

Las proyecciones hacia finales del siglo XXI anticipan una amplificación significativa de la demanda evaporativa, con anomalías positivas de DPV particularmente agudas en Baja California, Sonora y Coahuila, frente a incrementos más contenidos en el Altiplano y el Bajío. Lo anterior podría estar relacionado con un posible fenómeno de aridificación atmosférica el cual ocurre simultáneamente con un aumento generalizado de la humedad específica (q). Esto indica que el incremento observado del DPV está dominado por el forzamiento termodinámico del calentamiento sobre la presión de saturación de vapor (relación Clausius-Clapeyron), mecanismo que predomina sobre la disponibilidad de humedad absoluta, especialmente en las temporadas críticas durante el periodo primavera – verano donde la demanda evaporativa y el estrés atmosférico son más altos.

Para el sector vitivinícola, estas condiciones anticipan un entorno de mayor estrés atmosférico que impondrá desafíos sustanciales en la gestión hídrica y la fenología de la vid, particularmente en las regiones del noroeste y norte. La identificación precisa de los contrastes espaciales y la estacionalidad del cambio proyectado constituye un insumo estratégico para el diseño de medidas de adaptación, tales como la selección de variedades resilientes y la optimización del riego. Finalmente, este trabajo proporciona una línea base climática y un diagnóstico de cambio que puede servir como insumo para evaluaciones de vulnerabilidad y estudios de impacto más detallados a escala regional.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica del Norte de Aguascalientes y al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, por las facilidades para la realización de este estudio.

REFERENCIAS

- [1] Nwayor, I.J.; Robeson, S.M.; Ficklin, D.L.; Maxwell, J.T. A Multiscale Standardized Vapor Pressure Deficit Index for Drought Monitoring and Impacts. *International Journal of Climatology* 2024, 44, 5825–5838, doi:10.1002/joc.8668.
- [2] Zhong, Z.; Chen, H.W.; Dai, A.; Zhou, T.; He, B.; Su, B. Sub-diurnal asymmetric warming has amplified atmospheric dryness since the 1980s. *Nature Communications* 2025, 16, 8247, doi:10.1038/s41467-025-63672-z.
- [3] Xu, J.; Yao, M.; Chen, Y.; Jiang, L.; Xing, B.; Clarke, H. The Range of Projected Change in Vapour Pressure Deficit Through 2100: A Seasonal and Regional Analysis of the CMIP6 Ensemble. *Climate* 2025, 13, 143.
- [4] Azorin-Molina, C.; Vicente-Serrano, S.M.; Sanchez-Lorenzo, A.; McVicar, T.R.; Morán-Tejeda, E.; Revuelto, J.; El Kenawy, A.; Martín-Hernández, N.; Tomas-Burguera, M. Atmospheric evaporative demand observations, estimates and driving factors in Spain (1961–2011). *Journal of Hydrology* 2015, 523, 262–277.
- [5] Wang, M.; Hu, Z.; Liu, X.; Hou, W. Vapor pressure deficit (VPD) downscaling based on multi-source remote sensing, in-situ observation, and machine learning in China. *Journal of Hydrology: Regional Studies*

- 2025**, 57, 102192, doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102192>
- [6] Cameron, W.; Petrie, P.R.; Barlow, E.W.R.; Howell, K.; Jarvis, C.; Fuentes, S. A comparison of the effect of temperature on grapevine phenology between vineyards. *Oeno One* **2021**, 55, 301–320, doi:<https://doi.org/10.20870/oeno-one.2021.55.2.4599>
- [7] Hannah, L.; Roehrdanz, P.R.; Ikegami, M.; Shepard, A.V.; Shaw, M.R.; Tabor, G.; Zhi, L.; Marquet, P.A.; Hijmans, R.J. Climate change, wine, and conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **2013**, 110, 6907–6912, doi:10.1073/pnas.1210127110.
- [8] van Leeuwen, C.; Destrac-Irvine, A. Modified grape composition under climate change conditions requires adaptations in the vineyard. *OENO One* **2017**, 51, 147–154, doi:10.20870/oeno-one.2016.0.0.1647.
- [9] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural: México, 2025.
- [10] Muñoz-Sabater, J.; Dutra, E.; Agustí-Panareda, A.; Albergel, C.; Arduini, G.; Balsamo, G.; Boussetta, S.; Choulga, M.; Harrigan, S.; Hersbach, H.; et al. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth Syst. Sci. Data* **2021**, 13, 4349–4383, doi:10.5194/essd-13-4349-2021.
- [11] Williams, K.D.; Copsey, D.; Blockley, E.W.; Bodas-Salcedo, A.; Calvert, D.; Comer, R.; Davis, P.; Graham, T.; Hewitt, H.T.; Hill, R.; et al. The Met Office Global Coupled Model 3.0 and 3.1 (GC3.0 and GC3.1) Configurations. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* **2018**, 10, 357–380, <https://doi.org/10.1002/2017MS001115>
- [12] Thrasher, B.; Wang, W.; Michaelis, A.; Melton, F.; Lee, T.; Nemani, R. NASA Global Daily Downscaled Projections, CMIP6. *Scientific Data* **2022**, 9, 262, doi:10.1038/s41597-022-01393-4.
- [13] Coppola, E.; Raffaele, F.; Giorgi, F. et al. Climate hazard indices projections based on CORDEX-CORE, CMIP5 and CMIP6 ensemble. *Clim Dyn* 57, 1293–1383 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05640-z>
- [14] Torres-Alavez, J.A., Das, S., Corrales-Suastegui, A. et al. Future projections in the climatology of global low-level jets from CORDEX-CORE simulations. *Clim Dyn* 57, 1551–1569 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05671-6>
- [15] Torres-Alavez, J.A., Glazer, R., Giorgi, F. et al. Future projections in tropical cyclone activity over multiple CORDEX domains from RegCM4 CORDEX-CORE simulations. *Clim Dyn* 57, 1507–1531 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05728-6>