

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Oceanografía Física**

**Impacto del cambio climático en regiones vitivinícolas
de México**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Blanca Natalia Castillo Bautista

Ensenada, Baja California, México

2021

Tesis defendida por

Blanca Natalia Castillo Bautista

y aprobada por el siguiente Comité

Dra. María Tereza Cavazos Pérez

Director de tesis

Dr. Edgar Gerardo Pavía López

Dr. Thomas Gunter Kretzschmar

Dra. Cristina Pino



Dr. José Gómez Valdés

Coordinador del Posgrado en Oceanografía Física

Dra. Rufina Hernández Martínez

Directora de Estudios de Posgrado

Blanca Natalia Castillo Bautista © 2021

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis

Resumen de la tesis que presenta **Blanca Natalia Castillo Bautista** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Física.

Impacto del cambio climático en regiones vitivinícolas de México

Resumen aprobado por:

Dra. María Tereza Cavazos Pérez
Directora de tesis

El objetivo de esta tesis fue analizar el clima presente de México y el sur de Estados Unidos y los posibles cambios durante el siglo 21, con énfasis en las principales regiones vitivinícolas de México y California. Se usaron diversos índices a partir de observaciones y de simulaciones de dos modelos climáticos regionales (RegCM4.7 y RCA4) para un periodo histórico (1981-2010) y bajo dos escenarios de emisiones de gases de invernadero (RCP2.6 y RCP8.5) para un futuro cercano (2021-2050) y uno lejano (2070-2099). Ambos modelos reprodujeron las características principales de los climas mediterráneo y semiárido de las regiones analizadas; sin embargo, el RegCM4.7 mostró un sesgo cálido en Baja California y California, mientras que el RCA4 fue más frío que las observaciones en el altiplano Mexicano; los dos modelos presentaron sesgos húmedos en las regiones de topografía compleja. A pesar de estos sesgos, los dos modelos sugieren rangos de cambio muy similares en las regiones vitivinícolas. Para mediados de siglo se esperan incrementos de temperatura ($\sim 1.2^{\circ}\text{C}$) en dichas regiones y la temporada de crecimiento de la uva (Abr-Oct) podría adelantarse medio mes, pero seguirían siendo aptas para la viticultura. Los cambios más relevantes se esperan hacia finales del siglo 21 con el escenario de altas emisiones (RCP8.5); las unidades de calor y la temperatura mínima podrían incrementarse significativamente ($\sim 800^{\circ}\text{D}$ y 4.5°C , respectivamente), especialmente en Coahuila. Bajo este mismo escenario, la precipitación anual podría disminuir hasta ~ 200 mm en el altiplano central y la temporada de crecimiento podría adelantarse hasta un mes; así mismo la cobertura de área para cultivar la vid en México y Estados Unidos podría reducirse entre 46.5% (según el RCA) y 53.2% (RegCM), con un impacto mayor en el Altiplano y el noreste de México. Por lo tanto, la viticultura y la industria vitivinícola de estas regiones podrían verse afectadas bajo el escenario RCP8.5 y a finales del siglo 21, por lo que sería necesario tomar medidas de adaptación y mitigación para que las zonas aptas en la actualidad continúen siendo productivas en este sector.

Palabras clave: Viticultura, escenarios de cambio climático, modelos regionales, índices climáticos, México, California

Abstract of the thesis presented by **Blanca Natalia Castillo Bautista** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Physical Oceanography.

Impact of climate change in Mexican wine regions

Abstract approved by:

Dr. María Tereza Cavazos Pérez
Thesis Director

The objective of this thesis was to analyze the current climate of Mexico and the southern United States and the possible changes during the 21st century, with an emphasis on the wine growing regions of Mexico and California. Various indices were used based on observations and simulations of two regional climate models (RegCM4.7 and RCA4) for a historical period (1981-2010) and for the near future (2021-2050) and a far-future (2070-2099) period under two greenhouse gas emission scenarios (RCP2.6 and RCP8.5). Both models reproduced the main characteristics of the Mediterranean and semiarid climates of the regions analyzed; however, RegCM4.7 showed a warm bias in Baja California and California, while RCA4 was colder than the observations in the Mexican high plateau; both models presented wet biases in regions of complex topography. Despite these biases, the two models suggest very similar ranges of change in wine regions. Increases in temperature (~ 1.2 °C) are expected in these regions by the middle of the century, which could produce an early start of the grape season (from April to mid-March), but they would still be suitable for viticulture. The most relevant changes are expected towards the end of the 21st century under the high emissions scenario (RCP8.5); heat units and minimum temperature could increase significantly (~ 800 °D and 4.5 °C, respectively), especially in Coahuila. Under this same scenario, annual precipitation could decrease to ~ 200 mm in the central high plateau, and the onset of the growing season could be advanced by up to a month. Likewise, the area coverage to cultivate the vine in Mexico and the United States could be reduced between 46.5% (according to RCA) and 53.2% (RegCM), with a more significant impact on the high plateau and northeastern Mexico. Therefore, viticulture and the wine industry could be affected in these regions under the RCP8.5 scenario and at the end of the 21st century. It would be necessary to implement adaptation and mitigation strategies so that the current wine producing regions continue to be productive in this sector.

Keywords: Viticulture, climate change scenarios, climate indices

Dedicatoria

A ti que estás desde el cielo cuidándome y nunca me has dejado sola, te amo papá.

Esta va para ti también, mamá.

A mi Arturo.

A mi bebé Flash.

Agradecimientos

A mi papá por nunca dejarme sola, a pesar de que en medio del posgrado te fuiste, siempre has estado presente en toda esta odisea, te amo y te mando todo esto hasta el cielo, espero estés orgulloso. Mamá gracias por siempre apoyarme y ser fuerte hasta ahora, por cuidarme y venirte a ayudarme en este último proceso de la maestría.

A la Doctora Tereza Cavazos por su apoyo incondicional y su gran enseñanza en esta travesía llamada tesis, gracias por siempre ser perseverante y siempre estar ahí todos los días para mejorar este estudio; soy su fan desde la Licenciatura y lo seguiré siendo, ¡muchas gracias por todo!

Arturo gracias por todo, eres el mejor, gracias por estar en los momentos más difíciles del posgrado conmigo.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada por permitirme estudiar una maestría y brindarme los conocimientos para poder seguir aprendiendo. Al posgrado de Oceanografía Física por siempre brindarnos lo necesario para completar el posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría; No. de becario: 724641 y No. CVU: 893163.

A todos los miembros del comité por brindarme sugerencias para mejorar este estudio y por siempre participar en mis avances de tesis con muchos consejos. Dr. Pavía gracias por todos sus consejos, y por las reuniones para comprender mejor el proceso de un viñedo, Dra. Cristina y Dr. Thomas muchas gracias por su apoyo.

A todos mis compañeros y nuevas amistades que hice en el posgrado Mariana, Suzy, Siria, Yisus, Rosi, Gaby los quiero, nunca cambien compis.

Al ICTP por las salidas de los modelos climáticos regionales y al SMHI también por brindar estas salidas.

Tabla de contenido

Resumen en español	ii
Resumen en inglés	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	xiii
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación	5
1.3 Hipótesis	5
1.4 Objetivos	6
1.4.1 Objetivo general	6
1.4.2. Objetivos específicos	6
Capítulo 2. La vid y las regiones vitivinícolas	7
2.1 Fenología de la vid	7
2.2 Regiones vinícolas	9
Capítulo 3. Datos y metodología	16
3.1 Datos	16
3.1.1 Datos de observaciones	16
3.1.2 Modelos climáticos y reanálisis	16
3.2 Metodología	18
3.2.1 Índices y métricas climáticas	18
3.2.2 Áreas con aptitud vitivinícola	26
Capítulo 4. Resultados	27
4.1 Periodo histórico	27
4.1.1 Temperatura media anual	27
4.1.2 Climogramas	29
4.1.3 Unidades Calor 1981-2010	33
4.1.4 Precipitación de la temporada de crecimiento (GSP) 1981-2010	35
4.1.5. Índice de noches frías (CI) 1981-2010	37
4.1.6 Coeficiente hidrotérmico (HTC) 1981-2010	39
4.1.7 Frecuencia de regiones y cobertura de área con aptitud vitivinícola 1981-2010	41

4.2 Periodos futuros: NF (2021-2050) y FF (2070-2099)	44
4.2.1 Climatologías diarias de temperatura	44
4.2.2 Precipitación mensual futura	48
4.2.3 Unidades Calor (UC) futuras	54
4.2.4 Precipitación de la temporada de crecimiento (GSP)	60
4.2.5 Índice de noches frías (CI)	63
4.2.6 Coeficiente hidrotérmico (HTC)	65
4.2.7 Frecuencia de regiones y área con aptitud vinícola	68
Capítulo 5. Discusión	71
Capítulo 6. Conclusiones	82
Literatura citada	85

Lista de figuras

- Figura 1.** Mapa de las principales regiones vitivinícolas del mundo (en rojo) y las isotermas de 12 y 22°C como un factor que favorece la viticultura. Tomada de Tiefenbacher y Townsend, 20191
- Figura 2.** Etapa vegetativa y reproductiva de la vid de acuerdo al Hemisferio Norte y el Hemisferio Sur. Tomada de Hélder Fraga et al., 2012.....7
- Figura 3.** Diferentes tipos de vid de acuerdo con la temperatura media de la temporada de crecimiento. El ancho de los rectángulos verticales indica la duración estimada de la maduración de cada variedad. Tomada de Hélder Fraga et al., 2012.....9
- Figura 4.** Área de estudio y topografía (m). Las estrellas (*) moradas en el mapa del centro indican las regiones vitivinícolas analizadas en este trabajo: a) Napa Valley, California, b) Baja California, c) Coahuila, d) Zacatecas, e) Mapa de estudio, f) Nuevo León, g) Aguascalientes, h) Guanajuato, i) Querétaro. Mientras que los estrellas, triángulos y cruces en color negro son los viñedos, estaciones y puntos de malla, respectivamente.12
- Figura 5.** Grados día para un periodo de 24 horas entre las líneas punteadas. Adaptada de la Universidad de California, <http://ipm.ucanr.edu/WEATHER/ddfig52.html>**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura 6.** Fórmula para calcular los grados día (°D) para un periodo de 24 horas. Adaptada de la Universidad de California, <http://ipm.ucanr.edu/WEATHER/ddfig52.html>21
- Figura 7.** Caso 3 para calcular grados día (°D, área sombreada) para un periodo de 24 horas. Adaptada de la Universidad de California, <http://ipm.ucanr.edu/WEATHER/ddfig52.html>21
- Figura 8.** Caso 4 para calcular grados día (°D) para un periodo de 24 horas. Adaptada de la Universidad de California, <http://ipm.ucanr.edu/WEATHER/ddfig52.html>22
- Figura 9.** Caso 5 para calcular grados día (°D) para un periodo de 24 horas. Adaptada de la Universidad de California, <http://ipm.ucanr.edu/WEATHER/ddfig52.html>23
- Figura 10.** Caso 6 para calcular grados día (°D) para un periodo de 24 horas. Adaptada de la Universidad de California, <http://ipm.ucanr.edu/WEATHER/ddfig52.html>23
- Figura 11.** Temperatura media anual en el periodo histórico. Las isotermas negra y blanca son de 10°C y 20°C, respectivamente, de acuerdo con las diferentes bases de datos. (a) Livneh (observaciones), (b) RegCM-ERA, (c) RegCM-Had, (d) RegCM-MPI, (e) RegCM-GFDL, (f) RegCM-Ens, (g) RCA-ERA, (h) RCA-Had, (i) RCA-MPI, (j) RCA-GFDL, (k) RCA-Ens28
- Figura 12.** Sesgos de temperatura media anual en el periodo histórico de los dos modelos regionales relativos a las observaciones de Livneh. a) RegCMERA, b) RegCMHad, c) RegCMMPI, d) RegCMGFDL, e) RegCMEns, f) RCAERA, g) RCAHad, h) RCAMPI, i) RCAGFDL, j) RCAEns.....29
- Figura 13.** Climogramas de las regiones vitivinícolas de los siete estados analizados. Las curvas son Tmax, Tmed y Tmin y las barras son la precipitación mensual. Las líneas continuas son las observaciones con Livneh y las punteadas son de los modelos regionales (a) RCA-ERA y (b) Reg-ERA. Las barras azules son observaciones con CHIRPS y las rojas son de RCA-ERA en (a) y con Reg-ERA en (b). Cals:

Californias (Baja California y California, EUA), Coah: Coahuila, NL: Nuevo León, Zac: Zacatecas, Ags: Aguascalientes, Quer: Querétaro y Gto: Guanajuato.32

- Figura 14.** Unidades Calor de acuerdo con las observaciones de Livneh y los dos modelos regionales forzados con tres modelos globales y sus ensambles promedio (Ens). La isolínea negra es el umbral inferior de 850°D, mientras que la blanca es el umbral superior de de 2700°D. (a) Livneh, columna izquierda: (b) RegCM-ERA, (c) RegCM-Had, (d) RegCM-MPI, (e) RegCM-GFDL, (f) RegCM-Ens; y columna derecha: (g) RCA-ERA, (h) RCA-Had, (i) RCA-MPI, (j) RCA-GFDL, (k) RCA-Ens.....34
- Figura 15.** Sesgos de Unidades Calor de los dos modelos regionales relativos a las observaciones de Livneh para el periodo 1981-2010. Columna izquierda: (a) RegCM-ERA, (b) RegCM-Had, (c) RegCM-MPI, (d) RegCM-GFDL, (e) RegCM-Ens; y columna derecha: (f) RCA-ERA, (g) RCA-Had, (h) RCA-MPI, (i) RCA-GFDL, (j) RCA-Ens.35
- Figura 16.** Precipitación de la temporada de crecimiento (GSP) de las observaciones (Livneh y Chirps) y de los dos modelos regionales (RegCM y RCA). La isoyeta azul oscuro es de 300 mm, mientras que la rosa es de 600 mm. Columna izquierda (a) Livneh y (b) Chirps; columna central: (c) RegCM-ERA, (d) RegCM-Had, (e) RegCM-MPI, (f) RegCM-GFDL, (g) RegCM-Ens; y columna derecha: (h) RCA-ERA, (i) RCA-Had, (j) RCA-MPI, (k) RCA-GFDL y (l) RCA-Ens.....36
- Figura 17.** Sesgos de la precipitación de la temporada de crecimiento (GSP) relativos a las observaciones de Chirps. Columna izquierda: (a) RegCM-ERA, (b) RegCM-Had, (c) RegCM-MPI, (d) RegCM-GFDL, (e) RegCM-Ens; y columna derecha: (f) RCA-ERA, (g) RCA-Had, (h) RCA-MPI, (i) RCA-GFDL y (j) RCA-Ens.....37
- Figura 18.** Índice de noches frías (CI) de los dos modelos regionales. (a) Observaciones de Livneh; columna izquierda: (b) RegCM-ERA, (c) RegCM-Had, (d) RegCM-MPI, (e) RegCM-GFDL, (f) RegCM-Ens; y columna derecha: (g) RCA-ERA, (h) RCA-Had, (i) RCA-MPI, (j) RCA-GFDL, (k) RCA-Ens; y columna derecha: (g) RCA-ERA, (h) RCA-Had, (i) RCA-MPI, (j) RCA-GFDL y (k) RCA-Ens.38
- Figura 19.** Sesgos de índice de noches frías (CI) relativos a las observaciones de Livneh. Columna izquierda: (a) RegCM-ERA, (b) RegCM-Had, (c) RegCM-MPI, (d) RegCM-GFDL, (e) RegCM-Ens; y columna derecha: (f) RCA-ERA, (g) RCA-Had, (h) RCA-MPI, (i) RCA-GFDL, (j) RCA-Ens.39
- Figura 20.** Coeficiente hidrotérmico de la temporada de crecimiento (HTC) de los dos modelos regionales y las observaciones de Livneh. (a) Livneh; columna izquierda: (b) RegCM-ERA, (c) RegCM-Had, (d) RegCM-MPI, (e) RegCM-GFDL y (f) RegCM-Ens; columna derecha: (g) RCA-ERA, (h) RCA-Had, (i) RCA-MPI, (j) RCA-GFDL y (k) RCA-Ens.40
- Figura 21.** Sesgos de coeficiente hidrotérmico de la temporada de crecimiento (HTC) relativos a las observaciones de Livneh. Columna izquierda: (a) RegCM-ERA, (b) RegCM-Had, (c) RegCM-MPI, (d) RegCM-GFDL y (e) RegCM-Ens; columna derecha: (f) RCA-ERA, (g) RCA-Had, (h) RCA-MPI, (i) RCA-GFDL y (j) RCA-Ens.....41
- Figura 22.** Frecuencia de área con aptitud vitivinícola (en % de años durante 1981-2010) de los dos modelos regionales y las observaciones de Livneh. (a) Livneh; columna izquierda: (b) RegCM-ERA, (c) RegCM-Had, (d) RegCM-MPI, (e) RegCM-GFDL y (f) RegCM-Ens; columna derecha: (g) RCA-ERA, (h) RCA- Had, (i) RCA-MPI, (j) RCA-GFDL y (k) RCA-Ens.....42
- Figura 23.** Climatologías diarias de Tmax y Tmin de las observaciones de Livneh y del ensamble del modelo regional RegCM para el periodo histórico (Hist: 1981-2010), futuro cercano (NF: 2021-2050) y

- futuro lejano (FF: 2070-2099), bajo el escenario RCP2.6 de bajas emisiones en las regiones vitivinícolas de siete estados de México. Las curvas cerca del cero son los cambios (delta) futuros de las variables. Las líneas quebradas verticales indican el periodo de crecimiento entre abril y octubre y las líneas horizontales son los umbrales de temperatura de 10 y 22°C.....45
- Figura 24.** Igual que la Fig. 23, pero para los escenarios de bajas emisiones (RCP2.6) de los ensambles del modelo regional RCA.46
- Figura 25.** Como la Fig. 23, pero para el escenario RCP8.5 de altas emisiones del RegCM.....47
- Figura 26.** Como Fig. 24, pero para el escenario de altas emisiones del RCA.....48
- Figura 27.** Precipitación mensual (ciclo anual) observado con Livneh y con el modelo RegCM para el periodo histórico (RegCMEns Hist), futuro cercano (RegCMEns NF) y futuro lejano (RegCMEns FF), bajo el escenario (RCP2.6) de bajas emisiones. Las líneas punteadas son los cambios futuros (deltas) de la precipitación para los dos periodos.49
- Figura 28.** Como Fig. 27, pero para el modelo RCA.51
- Figura 29.** Como la Fig. 27, pero bajo el escenario de altas emisiones.52
- Figura 30.** Como Fig. 29, pero para el modelo RCA.53
- Figura 31.** Unidades calor bajo el escenario de bajas emisiones en el futuro cercano (2021-2050) en la primera columna izquierda (a) y lejano en la segunda columna (e); y bajo el escenario de altas emisiones en el futuro cercano en la tercera columna (i) y en el futuro lejano en la columna derecha (m). En a), e) i) y m) RegCM-Had. En b), f), j) y n) RegCM-MPI. En c), g), k) y o) RegCM-GFDL. En d), h), l) y p) RegCM-Ens.54
- Figura 32.** Cambio (delta) de unidades calor con el escenario de bajas emisiones entre el futuro cercano y el periodo histórico en la primera columna, entre el futuro lejano y el histórico en la segunda columna y entre el futuro lejano y cercano en la tercera columna. Primera línea: (a), (e) y (i) simulaciones de RegCM-Had. Segunda línea: (b), (f) y (j) RegCM-MPI. Tercera línea: (c), (g) y (k) RegCM-GFDL. Última línea: (d), (h) y (l) RegCM-Ens. La isolínea negra continua es la de 2700°D en el periodo histórico de Livneh y la punteada es la de 850°D. Las estrellas en la última columna son los cambios significativos; en la primera y segunda columnas todo el dominio tiene cambios significativos, pero las estrellas no se muestran.55
- Figura 33.** Cambio (delta) de unidades calor con el escenario de altas emisiones entre el futuro cercano y el periodo histórico en la primera columna, entre el futuro lejano y el histórico en la segunda columna y entre el futuro lejano y cercano en la tercera columna. Primera línea: (a), (e) y (i) simulaciones de RegCM-Had. Segunda línea: (b), (f) y (j) RegCM-MPI. Tercera línea: (c), (g) y (k) RegCM-GFDL. Última línea: (d), (h) y (l) RegCM-Ens. La isolínea negra continua es la de 2700°D en el periodo histórico de Livneh y la punteada es la de 850°D. Todos los cambios son significativos en este escenario56
- Figura 34.** Escenarios futuros de las unidades calor con la corrección por sesgo de RegCM del ensamble de los modelos globales: RCP2.6 NF es el periodo 2021-2050; RCP2.6 FF 2070-2099; RCP8.5 NF (2021-2050) y RCP8.5 FF (2070-2099).57

- Figura 35.** Unidades calor bajo el escenario de bajas emisiones en el futuro cercano (2021-2050) en la primera columna izquierda (a) y lejano en la segunda columna (e); y bajo el escenario de altas emisiones en el futuro cercano en la tercera columna (i) y en el futuro lejano en la columna derecha (m). En a), e) i) y m) RCA-Had. En b), f), j) y n) RCA-MPI. En c), g), k) y o) RCA-GFDL. En d), h), l) y p) RCA-Ens.....58
- Figura 36.** Delta de unidades calor con el escenario de bajas emisiones entre el futuro cercano y el periodo histórico en la primera columna izquierda, entre el futuro lejano y el histórico en la segunda columna y entre el futuro lejano y cercano en la tercera columna a la derecha. En a), e) y i) son las simulaciones de RCA-Had; en b), f) y j) RCA-MPI; en c), g) y k) RCA-Ens. La isolínea negra continua es la de 2700^oD en el periodo histórico de Livneh y la punteada es la de 850^oD. Las estrellas negras indican cambios significativos entre el futuro cercano y lejano, en los otros periodos todos los cambios son significativos.....59
- Figura 37.** Delta de unidades calor con el escenario de altas emisiones entre el futuro cercano y el periodo histórico en la primera columna izquierda, entre el futuro lejano y el histórico en la segunda columna y entre el futuro lejano y cercano en la tercera columna a la derecha. En a), e) y i) son las simulaciones de RCA-Had; en b), f) y j) RCA-MPI; en c), g) y k) RCA-GFDL y en d), h) y l) RCA-Ens. La isolínea negra continua es la de 2700^oD en el periodo histórico de Livneh y la punteada es la de 850^oD.....60
- Figura 38.** Delta de precipitación de (TC) con el escenario de bajas emisiones entre el futuro cercano y el periodo histórico en la primera fila, y entre el futuro lejano y el histórico en la segunda fila. Delta con el escenario de altas emisiones entre el futuro cercano y el histórico en la tercera fila; entre el futuro lejano y el histórico en la cuarta fila. En a), b), c) y d) son las simulaciones de RegCM-Had. En e), f), g) y h) RegCM-MPI. En i), j), k) y l) RegCM-GFDL. En m), n), o), y p) RegCM-Ens...61
- Figura 39.** Delta de precipitación de (TC) con el escenario de bajas emisiones entre el futuro cercano y el periodo histórico en la primera fila, y entre el futuro lejano y el histórico en la segunda fila. Delta con el escenario de altas emisiones entre el futuro cercano y el histórico en la tercera fila; entre el futuro lejano y el histórico en la cuarta fila. En a), b), c) y d) son las simulaciones de RegCM-Had; en e), f), g) y h) RegCM-MPI; en i) y j) RegCM-GFDL y en k), l), m) y n) RegCM-Ens.62
- Figura 40.** Delta de índice de noches frías de septiembre (CI) con el escenario de bajas emisiones entre el futuro cercano y el periodo histórico en la primera fila, y entre el futuro lejano y el histórico en la segunda fila. Delta con el escenario de altas emisiones entre el futuro cercano y el histórico en la tercera fila; entre el futuro lejano y el histórico en la cuarta fila. En a), b), c) y d) son las simulaciones de RegCM-Had; en e), f), g) y h) RegCM-MPI; en i) y j) RegCM-GFDL y en k), l), m) y n) RegCM-Ens.....64
- Figura 41.** Delta de índice de noches frías de septiembre (CI) con el escenario de bajas emisiones entre el futuro cercano y el periodo histórico en la primera fila, y entre el futuro lejano y el histórico en la segunda fila. Con el escenario de altas emisiones en entre el futuro cercano y el histórico en la tercera fila; entre el futuro lejano y el histórico en la cuarta fila. En a), b), c) y d) son las simulaciones de RegCM-Had; en e), f), g) y h) RegCM-MPI; en i) y j) RegCM-GFDL y en k), l), m) y n) RegCM-Ens.....65
- Figura 42.** Delta de coeficiente hidrotérmico en la TC (HTC) con el escenario de bajas emisiones entre el futuro cercano y el periodo histórico en la primera fila, y entre el futuro lejano y el histórico en la segunda fila. Delta con el escenario de altas emisiones entre el futuro cercano y el histórico en la tercera fila; entre el futuro lejano y el histórico en la cuarta fila. En a), b), c) y d) son las

- simulaciones de RegCM-Had; en e), f), g) y h) RegCM-MPI; en i) y j) RegCM-GFDL y en k), l), m) y n) RegCM-Ens.....66
- Figura 43.** Delta de índice de coeficiente hidrotérmico en la TC (HTC) con el escenario de bajas emisiones entre el futuro cercano y el periodo histórico en la primera fila, y entre el futuro lejano y el histórico en la segunda fila. Con el escenario de altas emisiones en entre el futuro cercano y el histórico en la tercera fila; entre el futuro lejano y el histórico en la cuarta fila. En a), b), c) y d) son las simulaciones de RegCM-Had; en e), f), g) y h) RegCM-MPI; en i) y j) RegCM-GFDL y en k), l), m) y n) RegCM-Ens.....67
- Figura 44.** Frecuencia (en % de años) de condiciones vitivinícolas bajo el escenario de bajas emisiones en el futuro cercano (2021-2050) en la primera columna izquierda (a) y lejano en la segunda columna (e); y bajo el escenario de altas emisiones en el futuro cercano en la tercera columna (i) y en el futuro lejano en la columna derecha (m). En a), e) i) y m) RegCM-Had. En b), f), j) y n) RegCM-MPI. En c), g), k) y o) RegCM-GFDL. En d), h), l) y p) RegCM-Ens.....68
- Figura 45.** Frecuencia (en % de años) de condiciones vitivinícolas bajo el escenario de bajas emisiones en el futuro cercano (2021-2050) en la primera columna izquierda (a) y lejano en la segunda columna (e); y bajo el escenario de altas emisiones en el futuro cercano en la tercera columna (i) y en el futuro lejano en la columna derecha (m). En a), e) i) y m) RCA-Had. En b), f), j) y n) RCA-MPI. En c), g), k) y o) RCA-GFDL. En d), h), l) y p) RCA-Ens.69
- Figura 46.** Climatologías diarias de Tmax y Tmin de las observaciones de Livneh, el ensamble del modelo regional RegCM para el periodo histórico (Hist: 1981-2010) y de la corrección por sesgo de RegCM (Liv+RegCMEns) para el futuro cercano (NF: 2021-2050) y futuro lejano (FF:2070-2099), bajo el escenario RCP2.6 de bajas emisiones en las regiones vitivinícolas de siete estados de México.73
- Figura 47.** Como Fig. 46 pero para los escenarios de bajas emisiones de los ensambles y la corrección por sesgo del modelo regional RCA74
- Figura 48.** Como la Fig. 46 pero para la corrección por sesgo del escenario RCP8.5 de altas emisiones del RegCM.....75
- Figura 49.** Como Fig. 47 pero para la corrección por sesgo del escenario de altas emisiones del RCA76

Lista de tablas

- Tabla 1.** Estados vitivinícolas de México y toneladas de uva producidas en los últimos 6 años (todos los tipos de uva se refieren a uva industrial, uva fruta (de mesa), uva pasa y uva sin clasificar de acuerdo con datos del SIAP). Los estados con un asterisco no se analizaron en este trabajo.10
- Tabla 2.** Estados vitivinícolas con sus respectivos viñedos, coordenadas (°N, °W), altura promedio (msnm), estaciones climatológicas de CLICOM y las coordenadas de los puntos de malla utilizados en el estudio.....13
- Tabla 3.** Índices, sus clasificaciones de acuerdo con los diferentes umbrales, meses para el cálculo y referencias de las distintas métricas climáticas utilizadas para el análisis de las regiones vitícolas.25
- Tabla 4.** Resumen de las cuatro regiones vitivinícolas de acuerdo con el clima. Se muestra el promedio de las temperaturas y de las unidades calor (UC) de la temporada de crecimiento (abril-octubre), así como la precipitación anual con datos de observaciones de cada región (ver Fig. 13). En Baja California los datos son de Clicom y en las demás regiones los datos de temperaturas son de Livneh, mientras que los de precipitación son de Chirps.....33
- Tabla 5.** Porcentaje anual promedio y desviación estándar (std) de cobertura de área apta para la vitivinicultura en México y Estados Unidos de acuerdo con las Unidades de Calor de Livneh, RegCM y RCA durante 1981-2010.43
- Tabla 6.** Porcentaje promedio y cambios en la cobertura de área con aptitud vitivinícola y desviaciones estándar de los ensambles de RegCM y RCA para México y Estados Unidos en el futuro cercano (NF: 2021-2050) y futuro lejano (FF: 2070-2099) de acuerdo a los escenarios de bajas (RCP2.6) y altas (RCP8.5) emisiones. Cambios relativos al período histórico (ver Tabla 5).70
- Tabla 7.** Observaciones de Livneh (OBS) y los cambios en el futuro de los principales índices calculados en las regiones vitivinícolas con el modelo RegCM para los dos escenarios (RCP2.6 y RCP8.5) y los dos periodos futuros (NF y FF).....78
- Tabla 8.** Como Tabla 7, pero para el modelo RCA79

Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes

El vino ha sido un factor cultural importante desde las civilizaciones antiguas, tales como la griega, fenicia y romana, hasta la actualidad (Anderson, 2013), pero su producción y calidad podrían cambiar en el futuro debido al cambio climático (Fraga et al., 2012; Cabré et al., 2016). La uva común, la *Vitis vinífera*, es nativa de las regiones del mediterráneo, por lo que es más apta para cultivarse en este tipo de clima, y en regiones occidentales de los continentes donde el clima es templado con inviernos fríos y húmedos y veranos calurosos y secos (Viers et al., 2013). El clima tipo mediterráneo se localiza entre los 30° y 45° de ambos hemisferios y se encuentran entre las isothermas anuales de 10°C y 20°C a nivel mundial (Jones, 2007b) o entre las isothermas de 12° y 22°C de la temporada de crecimiento de la uva (Fig. 1). Sin embargo, la vid también se ha adaptado a climas húmedos de latitudes medias como en el estado de Washington en Estados Unidos (Jones, 2007b), British Columbia en Canadá, Argentina y China (H. Fraga et al., 2013; Viers et al., 2013), así como en el Altiplano Mexicano donde dominan los climas semiáridos continentales. De hecho, la viticultura en México se inició en el Altiplano, en el estado de Coahuila durante la época de la colonia (Faesler, 2003), pero la comercialización de vino más antigua la hizo la Vinícola Santo Tomás de Baja California en 1888 (Bodenstedt, 2010).

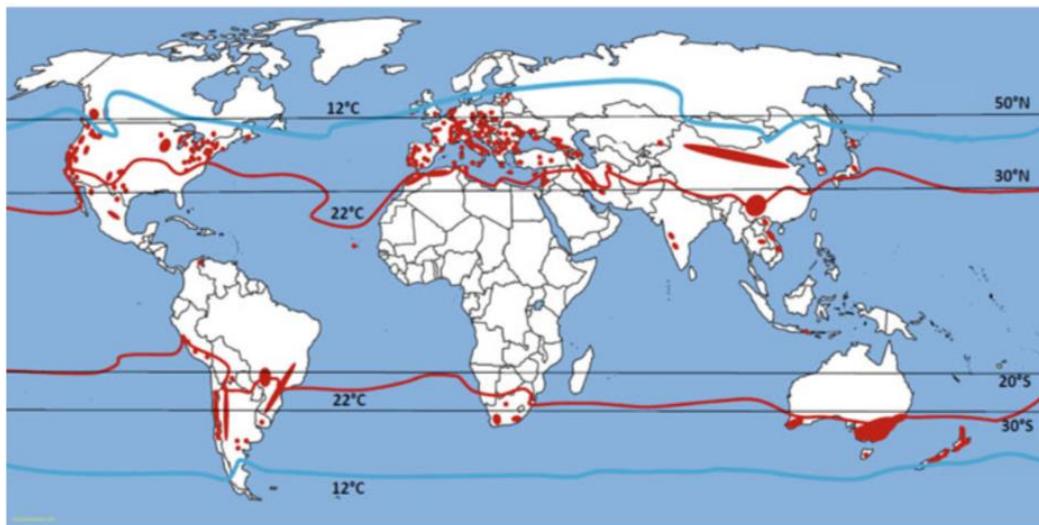


Figura 1. Mapa de las principales regiones vitivinícolas del mundo (en rojo) y las isothermas de 12 y 22°C como un factor que favorece la viticultura. Tomada de Tiefenbacher y Townsend, 2019

La temperatura es uno de los factores centrales de la viticultura ya que controla la fenología de la vid (Gladstones, 2011). Las vides son sensibles a las variaciones extremas, en particular a las temperaturas muy altas, que pueden dar lugar a vinos de mala calidad (White et al., 2006). De acuerdo con el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2013), las condiciones climáticas favorables para la producción del vino pueden verse afectadas por el calentamiento global, ya que un aumento promedio de 1.5 °C o mayor podría cambiar las temperaturas medias y extremas y la distribución de la precipitación (Hoegh-Guldberg et al., 2018) en diferentes regiones del mundo. En este trabajo se investiga el impacto del cambio climático en las regiones vitícolas de México y California a través del análisis de distintos índices climáticos y variables meteorológicas que son importantes para el desarrollo de la vid.

Diversos trabajos han evaluado los posibles efectos del cambio climático en algunas características relevantes de la viticultura como su distribución espacial, la temporada de crecimiento de la uva y los eventos climáticos extremos. Para esto se utilizan modelos climáticos de circulación global o regional. Por ejemplo, Jones (2007) utilizó las simulaciones del modelo global CCSM con distintos escenarios de emisión de gases de efecto invernadero (B1, A1B y A2) para evaluar los posibles cambios en los límites latitudinales de la viticultura a nivel global durante la temporada de crecimiento de la uva, la cual se sabe que en la actualidad es de abril a octubre en el Hemisferio Norte y de octubre a mayo en el Hemisferio Sur. Jones encontró una posible migración (y reducción del área) de las isothermas de 12 °C y 22 °C (de la temporada de crecimiento de la uva) hacia latitudes más altas a mediados del siglo 21, por lo que las regiones aptas para la viticultura también podrían desplazarse.

En forma similar, Hannah et al. (2013) también concluyeron que en un futuro las zonas vitivinícolas actuales podrían verse reducidas e inclusive desplazadas hacia los polos (latitudes más altas) por el efecto del cambio climático. Para esto, los autores evaluaron índices climáticos en Estados Unidos, Chile, Australia y el Noroeste de Europa utilizando 17 salidas de modelos de circulación general bajo los escenarios de bajas (RCP 4.5) y altas (RCP 8.5) emisiones. Sin embargo, van Leeuwen et al. (2013) criticó este estudio porque los autores utilizaron datos mensuales para obtener resultados de algunos índices, como las unidades calor (UC) que son de escala diaria.

También se han utilizado modelos regionales (con una mayor resolución espacial) para estudiar algunos aspectos de la viticultura; Ruml et al. (2012) compararon observaciones de estaciones en regiones vitícolas de Serbia con datos de temperatura y precipitación utilizando las salidas del modelo regional EBU-POM (Eta Belgrade University – Princeton Ocean Model) bajo los escenarios A1B y A2. Los autores no encontraron cambios significativos en las primeras décadas de este siglo, pero para finales del siglo 21 las

proyecciones mostraron que podría haber incrementos significativos en la temperatura, por lo que algunas nuevas zonas (más frías actualmente) podrían llegar a ser aptas para el cultivo de la vid en un futuro.

Mesterházy et al., (2014) analizaron la distribución espacial de distintos índices que caracterizan la producción del vino en Hungría con las salidas corregidas por sesgo de tres modelos climáticos regionales (RegCM4, ALADIN y PRECIS) bajo el escenario A1B. Los resultados mostraron un posible incremento de las UC durante el periodo de crecimiento de la uva en el siglo 21, así como un aumento en el número de años con temperaturas extremadamente altas para mediados y finales del siglo 21 pero, a pesar de esto, la región podría seguir siendo favorable para la producción de vinos tintos.

Firth et al. (2017) utilizaron el modelo regional WRF con una resolución de 5 km para analizar índices climáticos que son relevantes para la viticultura en el oeste de Australia bajo condiciones del clima actual y futuro con el escenario A2. Ellos encontraron que las proyecciones futuras del WRF forzado con tres modelos globales (CCSM3, CSIRO y ECHAM5) mostraron un calentamiento significativo en dos índices de temperatura, lo cual sugiere un riesgo para las regiones vitícolas de esa región.

Blanco Ward et al. (2019) analizaron índices bioclimáticos asociados a la vid y eventos extremos para la Región Demarcada Portuguesa del Douro (DDR) con simulaciones de alta resolución del WRF forzado con el modelo global MPI bajo condiciones de clima actual (1986-2005) y futuro (2046-2065, 2081-2100) para el escenario de altas emisiones RCP8.5. Ellos encontraron una relación positiva entre el incremento de la acumulación de calor en la temporada de crecimiento y el rendimiento de la cosecha, por lo que sugieren que la viticultura no se vería significativamente afectada en el futuro bajo esas condiciones.

En América del Norte también se ha estudiado el posible impacto de la variabilidad del clima y el cambio climático en la viticultura a través de observaciones y diversos modelos y escenarios. Por ejemplo, Jones et al. (2005) analizaron datos climáticos de la Red de Climatología Histórica de los Estados Unidos (USHCN, por sus siglas en inglés) de regiones donde se cultiva la vid en California, Oregon y Washington. Ellos encontraron que el periodo de crecimiento de la vid durante 1948-2002 presentó una tendencia positiva de temperatura, especialmente de temperatura mínima, y un mayor número de días cálidos. También encontraron una disminución en la tendencia anual de la ocurrencia de heladas en estas regiones, especialmente en primavera. Estos cambios representan un desafío en el proceso de la elaboración del vino, ya que la reducción en la ocurrencia de heladas de primavera adelanta la temporada de crecimiento, resultado consistente con Nemani et al. (2001), lo cual podría hacer que la planta sea más susceptible a plagas o enfermedades y, por lo tanto, afectar la calidad de la uva y el vino (Jones et al., 2005).

En Norteamérica también se han realizado estudios con modelos regionales, como el de White et al. (2006) quienes utilizaron el RegCM3 forzado por el modelo global FVGCM de la NASA con el escenario A2 de altas emisiones; ellos estimaron que el área de producción de vinos de alta calidad (Premium) en los Estados Unidos podría disminuir hasta un 81 % a finales del siglo 21 debido al incremento en la acumulación de horas calor durante la temporada de crecimiento de la uva. Los autores también encontraron que las heladas podrían disminuir y la frecuencia de días extremadamente cálidos (>35 °C) podría incrementarse, lo que tendría un efecto negativo en la producción de vino en Estados Unidos.

Hay varios estudios para México que sugieren un aumento generalizado de temperatura mayor a 1.5 °C después de mediados del siglo 21 y cambios de precipitación diferenciados regionalmente y por estación del año (Cavazos y Arriaga-Ramírez, 2012; Cavazos, Salinas, et al., 2013; Colorado-Ruiz et al., 2018; Cook et al., 2014; Fuentes-Franco et al., 2014; Torres-Alavez et al., 2014). También hay algunos estudios sobre los posibles impactos negativos en la agricultura de diversos productos, por ejemplo el maíz (Conde et al., 1999; Rueda-Magaña y Gay-García, 2002) y el café (Gay et al., 2006).

Cavazos y Arriaga-Ramírez (2012) analizaron salidas corregidas por sesgo de 6 modelos globales con los escenarios B1 y A2 de bajas y altas emisiones, respectivamente; los resultados sugieren una posible reducción de la precipitación (hasta un 30 %) en Baja California durante primavera e invierno a finales del siglo 21 y aumentos de temperatura mayores a 2°C para el Suroeste de Estados Unidos (al sur de los 35°N) y el Noroeste de México. Estos resultados son consistentes con estudios más recientes que han utilizado escenarios de altas emisiones RCP8.5 (ej., Cook et al., 2014; Colorado-Ruiz et al. 2018). Lo anterior podría afectar el potencial vitícola de las regiones actuales como lo sugieren algunos trabajos (ej. Jones et al., 2010).

En México hay muy pocos estudios sobre el cambio climático en zonas vitivinícolas de México. Valenzuela Solano et al. (2014) analizaron la región vitivinícola de Baja California con un sistema de información del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) basado en un ensamble de 10 modelos globales. Los autores encontraron un aumento en la acumulación de grados-día y temperaturas máximas promedio durante la temporada de crecimiento causando una reducción en el área de las zonas que pueden producir vinos de alta calidad.

En el reporte de Cavazos et al. (2013) se analizaron algunas métricas climáticas en todas las regiones vitivinícolas de México bajo condiciones actuales y futuras. La principal conclusión es que, aunque los escenarios muestran posibles incrementos de temperatura y de las unidades de calor y una reducción de

la precipitación invernal, la región vitivinícola de Baja California podría seguir siendo apta para la viticultura durante el siglo 21 y que la mayor limitante sería el agua y el desarrollo urbano. Para las regiones vitivinícolas del Altiplano se encontró una posible reducción en las áreas aptas para este sector agrícola. Sin embargo, en este trabajo sólo se utilizó un modelo global (HadGEM2-ES). En resumen, hay muy pocos estudios sobre el posible impacto del cambio climático en la viticultura en México, por lo que es muy relevante investigar este tema.

1.2 Justificación

En este trabajo se plantean las siguientes preguntas: ¿Cómo se verá afectado el clima de las regiones vitivinícolas de México bajo diferentes escenarios de cambio climático? ¿Habrá un cambio significativo del área potencialmente vitivinícola? ¿Qué factores explican estos cambios? ¿Surgirán nuevas áreas de oportunidad para el cultivo de la vid?

Para explicar estas preguntas se llevó a cabo una evaluación histórica de las principales regiones vitivinícolas de México (Baja California, Aguascalientes, Coahuila, Guanajuato, Querétaro y Zacatecas) para un periodo de referencia (1981-2010) y sus posibles cambios en dos periodos del siglo 21, futuro cercano (2021-2050) y lejano (2070-2099). Se utilizaron las simulaciones de la nueva versión del modelo climático regional RegCM4.7 a 25 km de resolución y el modelo regional atmosférico RCA4 a 50 km de resolución, forzados por tres modelos globales (HadGEM2-ES, MPI-ES y GFDL-ESM2M) bajo los escenarios de bajas (RCP2.6) y altas (RCP8.5) emisiones. En el estudio también se incluyó a Nuevo León, que tiene una región vitivinícola reciente y por tener una temporada de crecimiento más corta a la típica abril-octubre. Chihuahua y San Luis Potosí también son productores de vinos, pero a menor escala, por lo que no se incluyeron en este trabajo.

1.3 Hipótesis

Las zonas vitivinícolas actuales de México se verán afectadas y desplazadas espacialmente debido a un aumento en la temperatura y cambios en la precipitación hacia finales del siglo 21, causados por el cambio climático global.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Evaluar las características climáticas de las zonas vitivinícolas actuales en México y analizar los posibles impactos del cambio climático a mediados y finales del siglo 21.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Investigar el clima y la variabilidad en las regiones vitivinícolas de México con varios índices climáticos.
2. Evaluar los modelos regionales RegCM4.7.1 y RCA4 con respecto al ERA Interim y a las bases de datos climáticas observadas.
3. Analizar los cambios estacionales e interanuales de variables e índices climáticos bajo los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 para mediados (2021-2050) y finales (2070-2099) del siglo 21 con respecto al periodo histórico.
4. Identificar si, en el contexto del cambio climático, el área con aptitud vitivinícola en México cambiará; si es así, identificar nuevas zonas de oportunidad que podrían ser aptas para el cultivo de la vid y proponer medidas de adaptación.

Capítulo 2. La vid y las regiones vitivinícolas

2.1 Fenología de la vid

Para poder identificar las zonas que son aptas para la viticultura es importante comprender el proceso fenológico de la vid y qué factores influyen en su desarrollo. La vid cuenta con un ciclo vegetativo y otro reproductivo; el primero puede llegar a completarse a lo largo de un año mientras que el último puede llegar a durar dos años (Santos et al., 2020) (Fig. 2). A pesar de que el ciclo reproductivo es el que desarrolla características cualitativas y el número de racimos de vid de los años siguientes, el ciclo vegetativo abarca el periodo de crecimiento de la primavera al otoño y la dormancia de la vid en el invierno. Estos ciclos son, en gran parte, controlados por condiciones atmosféricas (Santos et al., 2020).

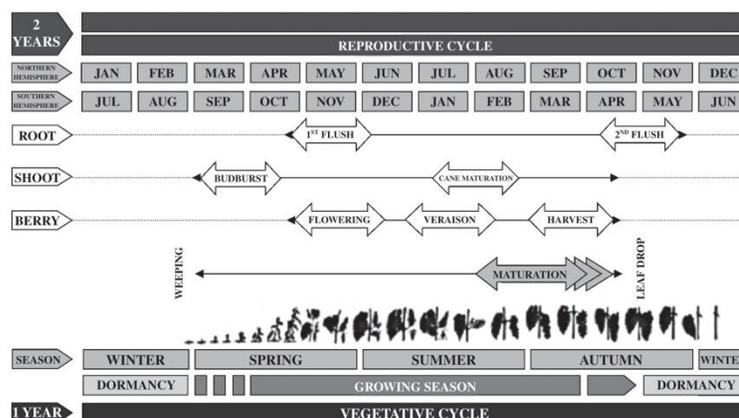


Figura 2. Etapa vegetativa y reproductiva de la vid de acuerdo al Hemisferio Norte y el Hemisferio Sur. Tomada de Hélder Fraga et al., 2012.

Los procesos atmosféricos y climáticos son de vital importancia ya que de acuerdo con las condiciones meteorológicas que existan en un lugar por un largo periodo de tiempo (clima) se determina si una región es apta o no para la viticultura y los tipos de vid que se podrían cultivar en diferentes zonas (Hélder Fraga et al., 2012; Santos et al., 2020). Además, el tiempo atmosférico a corto plazo determina el desarrollo efectivo de la vid durante la temporada de crecimiento ya que requiere cantidades de radiación, calor y disponibilidad de agua adecuadas para que la vid pueda desarrollar racimos con buen sabor, color, y cantidades y olores que sirven para la buena producción de vino (Santos et al., 2020). Una de las variables atmosféricas más importantes para la vid es la temperatura del aire ya que controla el crecimiento y la

productividad general de las uvas (Hélder Fraga et al., 2012). De hecho, la temperatura influye en la fisiología de la vid y el metabolismo/composición de la fruta a lo largo de la temporada de crecimiento. Desde la caída de las hojas a finales del otoño hasta el comienzo de la primavera, la vid está inactiva y consiste en su totalidad de tejido leñoso con poca actividad fisiológica (Santos et al., 2020). Este periodo abarca otros dos subperiodos que están controlados por factores térmicos endógenos y exógenos necesarios para la liberación de la inactividad. El primer subperiodo es la endodormancia la cual está dada por la acumulación de horas frío (unidades frío) durante el otoño-invierno, mientras que el segundo periodo, la ecodormancia, se desencadena por la acumulación de calor hasta la ruptura de los brotes. Es por esto que el frío invernal es importante para el crecimiento de la vid, ya que las temperaturas bajas promueven la latencia de las yemas (Kliewer y Soleimani, 1972; Santos et al., 2017, 2020).

Desde finales de invierno hasta inicios de la primavera, la acumulación de temperaturas medias diarias por encima de 10°C interrumpe la dormancia y ayuda al inicio del crecimiento de la vid (Amerine y Winkler, 1944). La duración de la temporada de crecimiento para cada variedad de uva está directamente relacionada con la temperatura media del aire de la temporada de crecimiento como se ve en la Fig. 3 (Jones, 2006). Este autor divide las regiones de acuerdo con varios umbrales de la temperatura del periodo de crecimiento desde 13-15°C (regiones frías) hasta el rango máximo de 19-24°C (regiones calientes). El rango máximo de temperatura limita la producción de uvas para vino y favorece a las pasitas y a las uvas de mesa, especialmente arriba de 22°C.

La duración de cada una de las etapas fenológicas difiere de acuerdo con cada variedad de uva, las condiciones térmicas de una región determinada, y año específico (Togores y Fernández-Cano, 2008). Por ejemplo, los periodos de floración, envero y maduración media de la vid son muy susceptibles a acontecimientos extremos como las ondas de calor, porque la uva podría llegar a tener una mayor acumulación de azúcar y disminuir su biosíntesis, además de que podría llegar a finalizar más temprano su maduración (Greer y Weedon, 2013; Webb et al., 2012). En cambio, en condiciones relativamente frescas la maduración se produce lentamente, lo que es favorable para producir vinos de mesa secos de calidad (Amerine y Winkler, 1944).

En otoño, el acortamiento gradual de la duración del día y la disminución de las temperaturas conducen a la aclimatación de las temperaturas bajas del invierno. Esta etapa usualmente coincide con la senescencia y posterior caída de las hojas y el siguiente período de dormancia.

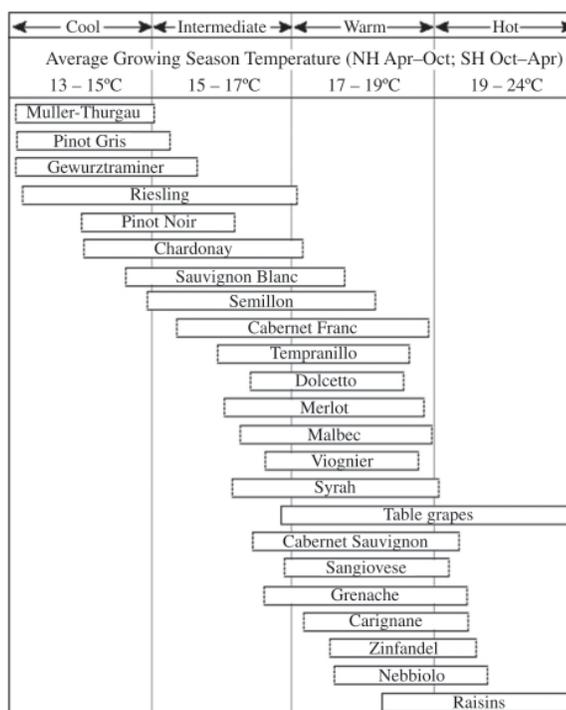


Figura 3. Diferentes tipos de vid de acuerdo con la temperatura media de la temporada de crecimiento. El ancho de los rectángulos verticales indica la duración estimada de la maduración de cada variedad. Tomada de Hélder Fraga et al., 2012.

2.2 Regiones vinícolas

La Fig. 4 muestra la zona de estudio con las seis regiones vitivinícolas más importantes de México (Baja California, Coahuila, Aguascalientes, Querétaro, Zacatecas y Guanajuato) que tienen temperaturas medias ideales para el desarrollo de la vid durante la temporada de crecimiento. En este análisis también se incluyó a Nuevo León por tener una vendimia más temprana que las otras regiones y al Valle de Napa en California por tener un clima mediterráneo como Baja California (de aquí en adelante, Las Californias). Sonora también es conocido por producir diferentes tipos de uvas, pero debido a sus altas temperaturas produce menos uvas de vino; de hecho, Sonora es el principal productor de uva de mesa en México (Cavazos et al., 2013).

De los 11 estados que se sabe son productores de vino mexicano (Baja California, Coahuila, Querétaro, Chihuahua, Guanajuato, Aguascalientes, Zacatecas, San Luis Potosí, Puebla, Sonora y Nuevo León), Baja California es el principal productor de vid para vino (su producción es del 65%); el resto del porcentaje (35%) se concentra en los estados de Coahuila, Querétaro, Aguascalientes y Zacatecas (Comité Nacional

del Sistema Producto Ovinos, 2018). Estos estados producen alrededor de 51,028 toneladas de uva industrial (es decir, para producción de vino, jugos y jaleas) (SAGARPA, 2018). De acuerdo con el SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera)¹ en 2019 estos estados en total produjeron 125,803.7 ton de uva (de todos los tipos), un aumento con respecto a 2018 en el cual se produjeron 104,115.22 ton de uva; estas cifras comprueban que la producción de vid ha aumentado en los últimos años, como puede verse en la Tabla 1. Los estados vitivinícolas más importantes producen el 23% de uva con respecto al total nacional y Sonora es el principal productor de uva de mesa a nivel nacional (96.5%).

Tabla 1. Estados vitivinícolas de México y toneladas de uva producidas en los últimos 6 años (todos los tipos de uva se refieren a uva industrial, uva fruta (de mesa), uva pasa y uva sin clasificar de acuerdo con datos del SIAP). Los estados con un asterisco no se analizaron en este trabajo.

Estados	Toneladas uva de todos los tipos					
	2019	2018	2017	2016	2015	2014
Baja California	26,664.80	19,941.60	24,153.60	19,002.41	22,188.30	24,704.70
Aguascalientes	12,297.50	9,958.40	14,440.80	11,659.10	12,086.70	9,868
Coahuila	13,774.60	4,804.80	4,541.80	4,413.90	2,624.90	2,732.40
Guanajuato	1,511.10	1,317	1,166.30	957.9	757.1	703.8
Nuevo León	31.1	13.2	10.8	2.5	125	3
Querétaro	1,545.40	2,090.40	2,444.70	2,808.50	2,130.30	2,009.90
Zacatecas	69,979.20	65,989.80	33,140.80	43,931.20	44,184.70	44,772.80
Chihuahua*	1,006	889.1	893	1,076.00	0	0
San Luis Potosí*	767.3	649.3	667	604.5	546	109.5
Sonora*	368,187.80	338,266.70	334,355.30	266,800.90	285,232.80	250,806.90
TOTAL	495,764.80	443,920.34	415,814.10	351,257	369,875.77	335,710.90

En los últimos años además de aumentar la producción de uva a nivel nacional, también se ha elevado la demanda del vino; de acuerdo con SAGARPA (2018), el consumo de este producto aumentó en un 20% en la última década, por lo cual está adquiriendo mayor importancia debido a que la producción actual de vid sólo cubre el 30% de la demanda nacional. Es por ello que se

¹ Tomado de <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

han adquirido con los años nuevas técnicas y han surgido nuevas zonas vitivinícolas para satisfacer la demanda del país. En este estudio se identifican y caracterizan las zonas vitivinícolas actuales y se analizan cómo podrían modificarse en el futuro debido al cambio climático.

Se utilizó Google Earth para identificar y seleccionar los viñedos, estaciones climatológicas (de la base CLICOM) y puntos de malla de las bases de datos (ver siguiente capítulo) cercanas a los viñedos más representativos de los estados seleccionados. Se localizaron los principales viñedos de cada estado y se tomaron las coordenadas y altura sobre el nivel del mar de cada uno de éstos. Posteriormente se localizaron las estaciones climatológicas de CLICOM cercanas a cada viñedo y se seleccionaron las que tuvieran datos desde 1981 hasta 2010. Si alguna de las estaciones tuvo el 80% de datos durante la temporada de crecimiento del Hemisferio Norte (de abril a octubre) y además si al menos tuvo 25 años de datos dentro del periodo histórico que cumpliera esta condición, entonces la estación climatológica se consideró para el análisis (Fig. 4).

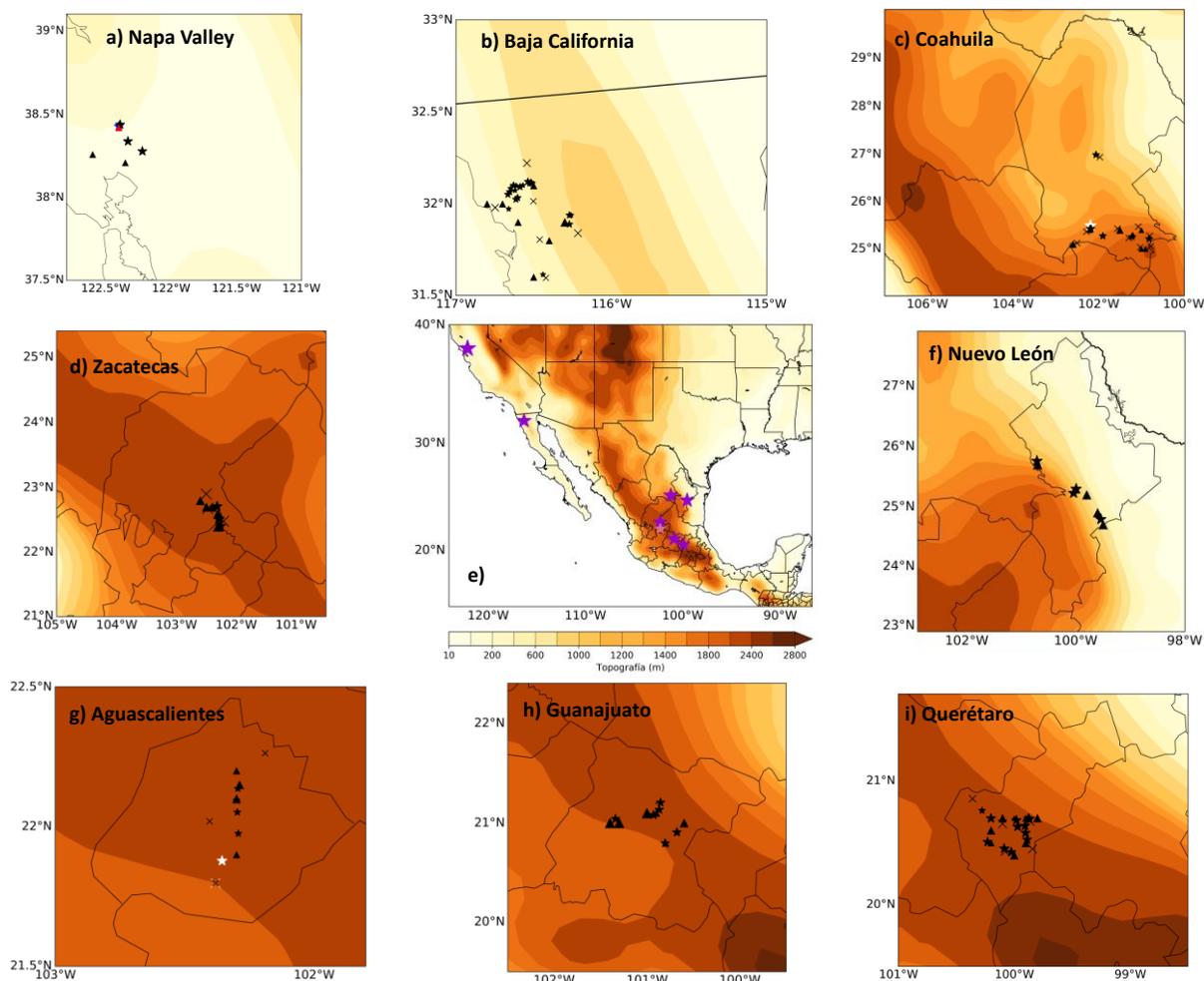


Figura 4. Área de estudio y topografía (m). Las estrellas (*) moradas en el mapa del centro indican las regiones vitivinícolas analizadas en este trabajo: a) Napa Valley, California, b) Baja California, c) Coahuila, d) Zacatecas, e) Mapa de estudio, f) Nuevo León, g) Aguascalientes, h) Guanajuato, i) Querétaro. Mientras que las estrellas, triángulos y cruces en color negro son los viñedos, estaciones y puntos de malla, respectivamente.

Para seleccionar los puntos de malla de las bases de datos de las observaciones de Livneh, y de los dos modelos climáticos regionales (RegCM y RCA) cercanos a los viñedos se consideraron las coordenadas de las estaciones de CLICOM que quedaron al final del control de calidad antes mencionado y se tomaron en cuenta los puntos de malla que estaban en un radio de 15 km con respecto a las coordenadas de las estaciones. Las estaciones, viñedos y coordenadas de cada uno de éstos se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Estados vitivinícolas con sus respectivos viñedos, coordenadas (°N, °W), altura promedio (msnm), estaciones climatológicas de CLICOM y las coordenadas de los puntos de malla utilizados en el estudio.

Estados	Viñedos	Coordenadas Viñedo	Altura promedio viñedos	Estaciones CLICOM	Coordenadas de estaciones	Puntos de malla seleccionados en el estado
Baja California	Monte Xanic	32.09,-116.58	358.47 msnm	Agua Caliente	32.1,-116.5	32.22,-116.54
	La Cetto	32.11,-116.52		Boquilla Santa Rosa	32,-116.8	31.98,-116.75
	La Casa de Doña Lupe	32.11,-116.51		Ojos Negros	31.9,-116.3	32.02,-116.5
	JC Bravo	32.08,-116.62		Olivares Mexicanos	32,-116.7	31.84,-116.2
	El Mogor	32.04,-116.60		San Vicente	31.3,-116.2	31.98,-116.75
	Bodega Santo Tomás	31.97,-116.66		Santo Tomás	31.8,-116.4	31.8,-116.46
	El Cielo	32.07,-116.65		Ejido Uruapan	31.6,-116.5	31.59,-116.42
	Bodegas F. Rubio	32.09,-116.64				
	Palafox Vinícola	31.61,-116.44				
	Tintos del Norte 32	32.10,-116.56				
	Bodega Paralelo	32.11,-116.53				
	Pedro Domecq	32.12,-116.54				
	Decantos	32.10,-116.63				
	Villa Montefiori	32.05,-116.66				
	Trevista Vineyards	32.10,-116.61				
	Cavas sol y barro	32.02,-116.61				
Bodega San Rafael	31.89,-116.27					
Aguascalientes	Casa Leal	21.98,-102.29	1888.8 msnm	Pabellón Campo Experimental	22.2,-102.3	21.79,-102.38
	Santa Elena de Aguascalientes	22.09,-102.3		Aguascalientes	21.9,-102.3	22.26,-102.18
	Planta Valle Redondo	21.87,-102.35		Los Negros	21.9,-102.3	22.02,-102.4

	Hacienda de Letras	22.13,-102.29		San Francisco de los Romo DGE	22.1,-102.3	
	Bodegas Origen	22.05,-102.29		Pabellón de Arteaga, SMN	22.14,-102.2	
Coahuila	Casa Madero	22.5,-102.19	1595.7 msnm	General Cepeda	25.4,-101.5	25.13,-102.50
	Don Leo	25.28,-101.9		Saltillo	25.4,-101	25.43,-101.55
	Las Pudencianas	25.43,-102.19		Las Hormigas	25,-100.9	25.37,-102.28
	Bodegas del Viento	25.21,-100.82		Gómez Farías	25,-101	25.47,-101.07
	Hacienda del Marqués	25.43,-102.17		San Juan la Vaquería	25.3,-101.2	25.06,-100.78
	San Juan de la Vaquería	25.26,-101.21		Huachichil	25.2,-100.8	25.03,-101.02
	Bodegas Ferriño	26.99,-102.06				25.23,-101.29
					25.27,-100.80	26.94,-101.96
Estados	Viñedos	Coordenadas Viñedo	Altura promedio viñedos	Estaciones CLICOM	Coordenadas de estaciones	Puntos de malla seleccionados en el estado
Guanajuato	Bodega Bernat	21.08,-100.92	2033.8 msnm	La Begoña	20.8,-100.8	20.81,-100.83
	Cuna de Tierra	21.20,-100.85		Los Rodríguez	21,-100.6	21.06,-101.33
	Santísima Trinidad Dolores Hidalgo	21.13,-100.86		Peñuelitas	21.1,-100.9	21.03,-100.85
	Dos Búhos	20.90,-100.68		Río Lajas	21.2,-100.9	21.26,-100.88
	San Miguel	20.79,-100.80		Guanajuato	21,-101.3	20.99,-101.33
	D' vinos	21.04,-101.34		Salamanca	21.1,-101	21.01,-101.09
	Vega Manchón	21.20,-100.85		Corral de Piedras	21,-100.6	21.06,-100.62
	Vinícola Toyán	20.90,-100.67		Chichimequillas	21,-101.4	
	San Lucas	20.90,-100.67				
Nuevo León	Vinícola Maravillas	25.76,-100.71	532.25 msnm	Camacho, Linares	24.9,-99.6	24.94,-99.54
	Viñedo del Centro de Producción Agropecuaria (UANL)	24.79,-99.54		Montemorelos	25.2,-99.8	24.92,-99.78

	Viñedo Garza Moschen	25.23,-100.04		Rinconada	25.7,-100.7	25.73,-100.6
	Casa Don Régulo	25.30,-99.99		Allende	25.3,-100	25.34,-100.07
				Benítez	24.7,-99.5	24.72,-99.52
Querétaro	La Redonda	20.63,-99.9	1949.07 msnm	Cadereyta de Montes	20.7,-99.8	20.67,-99.86
	Finca Sala Vivé by Freixenet Mexico	20.69,-99.87		San Juan del Río	20.4,-100	20.43,-100.07
	Los Rosales	20.58,-99.9		Presa Centenario	20.5,-99.9	20.45,-99.84
	Viñedos Azteca	20.69,-99.87		Nogales	20.7,-100.1	20.65,-100.10
	Vinos del Marqués	20.76,-100.27		La Venta	20.5,-100.2	20.43,-100.07
	Casa Vitivinícola Bodegas de Cote	20.69,-99.88				20.85,-100.36
	San Juanito Vitivinícola	20.63,-99.97				
	Puerta del Lobo	20.70,-100.20				
	Paso de Serra	20.68,-99.98				
	La Terquedad	20.50,-100.23				
	Cava 57	20.45,-100.08				
	Tres Sarmientos	20.42,-100.02				
	Viña Tx	20.52,-99.88				
Zacatecas	Vinos Tierra Adentro	22.71,-102.32	2042.5 msnm	Ojo caliente	22.6,-102.3	22.48,-102.21
	Viñedos el Alpino	22.52,-102.29		Trancoso	22.7,-102.4	22.68,-102.47
	Viña del Rocío	22.51,-102.28		San Gerónimo	22.7,-102.5	22.90,-102.50
	Vinícola Luévano de Ruíz	22.40,-102.26		Zacatecas	22.8,-102.6	
				Luis Maya	22.4,-102.3	

Capítulo 3. Datos y metodología

3.1 Datos

3.1.1 Datos de observaciones

Para poder lograr los objetivos de esta tesis primero se caracterizaron las zonas vitivinícolas más importantes en México; para ello se utilizaron datos de temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmin) y precipitación (Prec) de las siguientes bases de datos:

CLICOM (*Climate Computing Project*); este software contiene datos diarios observados en estaciones meteorológicas de México; es administrado por el Servicio Meteorológico Nacional (referido aquí como SMN) de México. Cada estación meteorológica tiene diferentes períodos de reporte, pero se pueden encontrar datos desde 1920 hasta 2012. CLICOM está disponible en: <http://clicom-mex.cicese.mx/>

Livneh (2015): Este conjunto de datos de malla se basa en los datos diarios de las estaciones meteorológicas observadas desde 53°N en Canadá hasta los 12°N en México (Livneh et al., 2015). Cuenta con datos desde 1950 hasta 2013 y tiene una resolución espacial de 1/16° (~6 km). Los datos están disponibles gratuitamente en: ftp://192.12.137.7/pub/dcp/archive/OBS/livneh2014.1_16deg/

CHIRPS (*The Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station dataset*) (Funk et al., 2015): Esta base tiene datos mensuales, pentadales y diarios de precipitación, con una resolución espacial de 0.05° (~5 km). El dominio abarca 50°N-50°S desde 1981 hasta el presente. Incorpora información satelital y datos observados de estaciones meteorológicas; está disponible en: http://chg.geog.ucsb.edu/data/chirps/#_Data

3.1.2 Modelos climáticos y reanálisis

RegCM4.7

En este trabajo se utilizaron las salidas diarias de la nueva versión del modelo climático regional del Centro Internacional de Física Teórica (ICTP, por sus siglas en inglés), el RegCM4 (Giorgi et al., 2012); el modelo

usa coordenadas verticales sigma-p, y se ejecuta en una malla de Arakawa B. Se utilizó la versión hidrostática a 25 km de resolución espacial en el dominio México-Centro América del Experimento Coordinado de Downscaling Regional (CORDEX-CAM), que incluye el Caribe, Centro América, México y EE. UU. hasta 45° N. Para la evaluación histórica (1979-2014) RegCM fue forzado con ERA-Interim 75, y el primer año de la simulación se consideró como spin-up del modelo. RegCM4.7 también fue forzado por tres modelos globales (HadGEM2-ES, MPI-ESM y GFDL-ESM2M) para un periodo histórico y los escenarios del siglo 21 con un total de 130 años de simulaciones; en esta tesis se consideró 1981-2010 como el período de referencia, y 2021-2050 como el futuro cercano (NF, por sus siglas en inglés) y 2070-2099 como el futuro lejano (FF) para los análisis de escenarios de bajas (RCP2.6) y altas (RCP8.5) emisiones de gases de efecto de invernadero. Las salidas de este modelo están disponibles en: <https://esgf-data.dkrz.de/search/cordex-dkrz/>

RCA4

También se utilizaron las salidas diarias de la versión más reciente del modelo atmosférico regional del Centro Rossby (RCA, por sus siglas en inglés) de Suecia. Tiene un núcleo dinámico y se corre en forma semi-lagrangiana (Samuelsson et al., 2011). El RCA4 tiene una resolución espacial horizontal de 0.44° (~50 km) y se utilizó para la reducción de escala utilizando los modelos globales del CMIP5 como condiciones iniciales y de frontera para generar escenarios de cambio climático. Las salidas de este modelo están disponibles en: <https://esgf-data.dkrz.de/search/cordex-dkrz/>

En este trabajo se analizaron las simulaciones históricas y futuras de RegCM4.7 y RCA4 forzadas con los mismos modelos globales, los cuales se describen a continuación.

- 1) **ERA-Interim** (de ahora en adelante, ERA) es un conjunto de datos atmosféricos de un modelo global reanalizado con observaciones; ERA es producido por el Centro Europeo de Pronóstico Meteorológico de Medio Alcance (ECMWF, por sus siglas en inglés) con una resolución espacial de 0.75° (~80 km). ERA está disponible desde el 1 de enero de 1989 hasta el 31 de agosto de 2019 y se puede encontrar en: <http://www.ecmwf.int> (Dee et al., 2011). A partir de 2019 este reanálisis se discontinuó y se sustituyó por el ERA5 que tiene una resolución ~32 Km.
- 2) **HadGEM2-ES** (*Hadley Global Environment Model 2-Earth System*) (a partir de ahora, Had) es un modelo atmosférico con una resolución espacial de 1.25° (latitudinal) x 1.87° (longitudinal) (~ 138

x 208 km en el Ecuador, reduciéndose a 120 km x 139 km en latitudes mayores de 55°) (Martin, 2011). Los datos están disponibles en: http://worldclim.org/cmip5_2.5m

- 3) **MPI-ESM**: El Modelo del Sistema Terrestre del Instituto Max Planck (MPI-ESM, por sus siglas en inglés, de ahora en adelante MPI) es la última versión de este instituto y la que se utilizará en el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 6 (CMIP 6, por sus siglas en inglés) (Müller et al., 2018). Tiene una resolución espacial de 1.8653° (latitudinal) x 1.875° (longitudinal) y se puede encontrar en: https://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/cersearch/q?query=*&page=0&hierarchy_steps_ss=CMIP5_RCM_forcing_MPI-ESM
- 4) **GFDL-ESM2M** (a partir de ahora GFDL): El modelo del Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos (GFDL por sus siglas en inglés) de Estados Unidos fue desarrollado para comprender cómo los ciclos biogeoquímicos de la Tierra interactúan con el sistema climático (Dunne et al., 2012). Tiene una resolución espacial de 220 km y está disponible en: <https://data1.gfdl.noaa.gov/>.

Para este estudio se remallaron las bases de datos observadas y de RCA4 a la malla de RegCM, con el fin de calcular los sesgos y tener una malla común a 25 km.

3.2 Metodología

3.2.1 Índices y métricas climáticas

Para caracterizar las áreas vitivinícolas en el periodo de referencia y durante el periodo de crecimiento de las uvas (abril a octubre) se utilizaron varios índices climáticos. Primero se hicieron los climogramas típicos de temperatura y precipitación de cada región y se calcularon las climatologías diarias a lo largo del año de temperatura máxima y mínima (T_{max} y T_{min}), así como de las temperaturas medias (T_{med}) a partir del promedio de las dos anteriores. Esto se hizo para determinar y entender el inicio y terminación de la temporada de crecimiento en el periodo histórico, y con los modelos regionales analizar cómo podrían cambiar en el futuro. Así mismo se calcularon la precipitación mensual e interanual y sus posibles cambios en el futuro; se calculó el sesgo de los modelos regionales con respecto a las observaciones y se hicieron diagramas de Taylor para cuantificar el error de los dos modelos regionales (RegCM y RCA). A

continuación, se describen los índices climáticos que se analizaron para México y Estados Unidos utilizando datos de observaciones y los dos modelos regionales.

a) Unidades Calor (UC)

La acumulación de horas calor o unidades de calor (UC) es importante para definir mejor las variaciones espaciales y temporales durante la estación de crecimiento y el potencial de los viciales en una región; por ejemplo, en California se han definido cinco regiones climáticas de acuerdo a las UC que pueden dar lugar a la producción de diferentes tipos de vides (Amerine y Winkler, 1944; Jones, 2005). Por lo tanto, una de las métricas que se utiliza para delimitar las zonas más aptas para la vitivinicultura son las UC que se encuentran en regiones que acumulan entre 850 y 2700 °D en la temporada de crecimiento. Además, si hay una acumulación mayor al umbral máximo de las UCs o si ocurren altas temperaturas por un tiempo prolongado durante la antesis y a lo largo del crecimiento de las bayas, la uva acumula mayor cantidad de calor, lo cual puede llegar a ser perjudicial ya que puede inducir estrés térmico, envero prematuro, abscisión de la baya, inactivación de las enzimas y menor desarrollo del sabor en la vid (Jones, 2005). Los rangos de UCs que utilizamos como referencia son con base en la clasificación propuesta por Jones et al., (2010) para los Grados Días Desarrollo (GDD), los cuales se muestran en la Tabla 3.

Para calcular las unidades de calor se usó la técnica del seno simple, la cual se usa ampliamente en la Universidad de California. Esta técnica se basa en los valores de Tmax y Tmin diarios y supone una curva sinusoidal como una aproximación de la variación diurna de la temperatura para estimar la acumulación de calor durante la temporada de crecimiento de la vid (Allen, 1976; Baskerville and Emin, 1969). En el cálculo se utiliza un umbral inferior y otro superior de temperatura de 10° y 30°C, respectivamente, para obtener el área bajo la curva. Hay seis casos (curvas) diferentes para calcular la acumulación de calor de acuerdo con el comportamiento diario de las temperaturas durante el periodo de crecimiento. Las fórmulas que se muestran a continuación se programaron en Matlab con los datos diarios de Tmax y Tmin para cada punto de malla y para cada estación climatológica; de acuerdo con su comportamiento se clasificaron según el tipo de curva y se obtuvieron las UCs características de cada lugar.

i) *Caso 1, completamente encima de ambos umbrales:* La curva sinusoidal que representa a la Tmax y Tmin se encuentra por arriba de ambos umbrales, como se muestra en la Fig. 5. Los grados día son calculados de la siguiente manera:

$$^{\circ}\text{D} = T_U - T_L \quad (1)$$

Donde:

T_U = Umbral superior

T_L = Umbral inferior

T_{max} = Temperatura máxima

T_{min} = Temperatura mínima

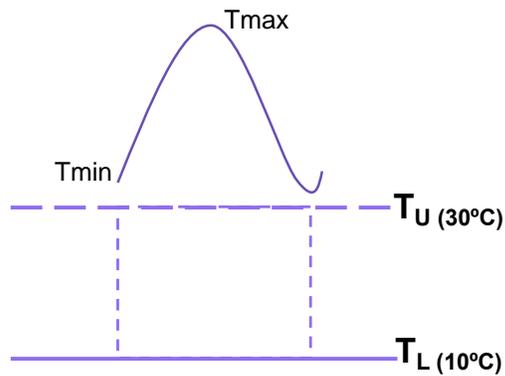


Figura 5. Grados día para un periodo de 24 horas entre las líneas punteadas. Adaptada de la Universidad de California, <http://ipm.ucanr.edu/WEATHER/ddfig52.html>

ii) *Caso 2, completamente debajo de ambos umbrales:* La curva sinusoidal representando a la Tmax y Tmin se encuentra por debajo de ambos umbrales, como se muestra en la Fig. 6. Aquí los grados día ($^{\circ}\text{D}$) son cero, ya que no hay áreas sombreadas en el diagrama.

T_U = Umbral superior

T_L = Umbral inferior

T_{max} = Temperatura máxima

T_{min} = Temperatura mínima

$${}^{\circ}D = 0 \quad (2)$$

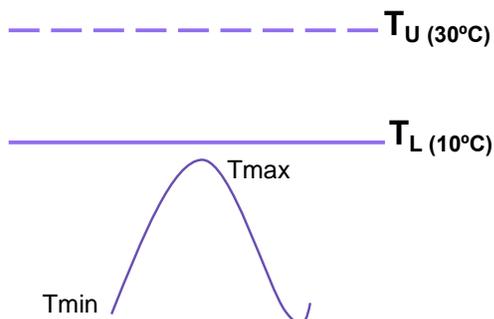


Figura 5. Fórmula para calcular los grados día (${}^{\circ}D$) para un periodo de 24 horas. Adaptada de la Universidad de California, <http://ipm.ucanr.edu/WEATHER/ddfig52.html>

iii) *Caso 3, completamente entre ambos umbrales:* En este caso la curva de temperaturas se encuentra debajo del umbral más alto y arriba del umbral más bajo (Fig. 7). La fórmula para calcular los grados día es la siguiente:

$${}^{\circ}D = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_L \quad (3)$$

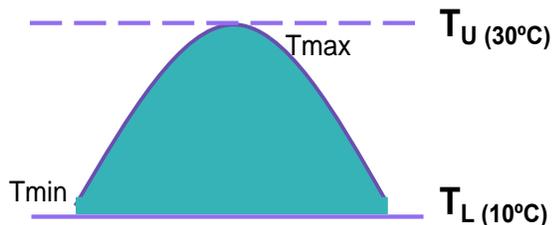


Figura 6. Caso 3 para calcular grados día (${}^{\circ}D$, área sombreada) para un periodo de 24 horas. Adaptada de la Universidad de California, <http://ipm.ucanr.edu/WEATHER/ddfig52.html>

iv) *Caso 4, Interceptado por el umbral más bajo:* La T_{min} se encuentra debajo de T_L , los grados día son lo sombreado en color verde agua (Fig. 8). Las fórmulas para calcular los ${}^{\circ}D$ y a θ_1 son las siguientes:

$${}^{\circ}\text{D} = \frac{1}{\pi} \left[\left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} - T_L \right) \left(\frac{\pi}{2} - \theta_1 \right) + \alpha \cos(\theta_1) \right] \quad (4)$$

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left[\left(T_L - \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \right) \div \alpha \right] \quad (5)$$

Donde α está dado por:

$$\alpha = \frac{(T_{\max} - T_{\min})}{2} \quad (6)$$

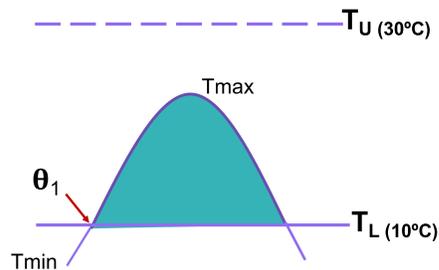


Figura 7. Caso 4 para calcular grados día (${}^{\circ}\text{D}$) para un periodo de 24 horas. Adaptada de la Universidad de California, <http://ipm.ucanr.edu/WEATHER/ddfig52.html>

v) *Caso 5, interceptado por el umbral superior:* la T_{\max} se encuentra por arriba del umbral superior (T_U), las UC son lo que se encuentran por debajo de este umbral, como se muestra en la Fig. 9. Las fórmulas para calcularlas son las siguientes:

$${}^{\circ}\text{D} = \frac{1}{\pi} \left\{ \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} - T_L \right) \left(\theta_2 + \frac{\pi}{2} \right) + (T_U - T_L) \left(\frac{\pi}{2} - \theta_2 \right) - [\alpha \cos(\theta_2)] \right\} \quad (7)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left[\left(T_U - \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \right) \div \alpha \right] \quad (8)$$

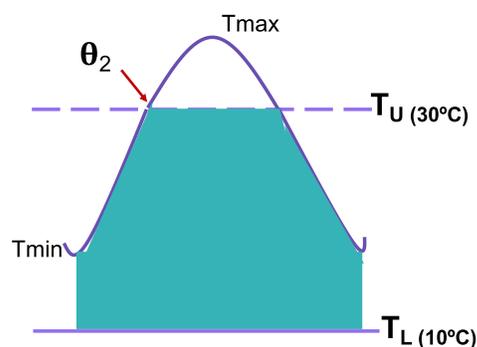


Figura 8. Caso 5 para calcular grados día ($^{\circ}\text{D}$) para un periodo de 24 horas. Adaptada de la Universidad de California, <http://ipm.ucanr.edu/WEATHER/ddfig52.html>

vi) *Caso 6, interceptado por ambos umbrales:* La T_{max} se encuentra por arriba del umbral superior, y la T_{min} por debajo del umbral inferior, por lo que las unidades calor son las que se encuentran entre ambos umbrales como se muestra en la Fig. 10. Las fórmulas para calcular las UC en este caso son las siguientes:

$$^{\circ}\text{D} = \frac{1}{\pi} \left\{ \left(\frac{T_{\text{max}} + T_{\text{min}}}{2} - T_L \right) (\theta_2 - \theta_1) + \alpha [\cos(\theta_1) - \cos \theta_2] + (T_U - T_L) \left(\frac{\pi}{2} - \theta_2 \right) \right\} \quad (9)$$

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left[\left(T_L - \frac{T_{\text{max}} + T_{\text{min}}}{2} \right) \div \alpha \right] \quad (10)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left[\left(T_U - \frac{T_{\text{max}} + T_{\text{min}}}{2} \right) \div \alpha \right] \quad (11)$$

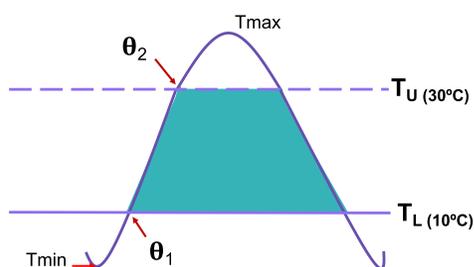


Figura 9. Caso 6 para calcular grados día ($^{\circ}\text{D}$) para un periodo de 24 horas. Adaptada de la Universidad de California, <http://ipm.ucanr.edu/WEATHER/ddfig52.html>

b) Índice de noches frías (CI)

Este índice es una variable de enfriamiento nocturno que toma en cuenta las temperaturas mínimas medias nocturnas durante septiembre (Ec. 12), mes de maduración en el hemisferio norte. La finalidad de este índice es evaluar los potenciales cualitativos de las regiones vinícolas a través de algunas características de la uva, tales como los aromas o polifenoles, los cuales son importantes para los vinos ya que van a dar una medida de los colores y aromas de éstos (Tonietto y Carbonneau, 2004).

$$CI = prom(T_{\min Sep}) \quad (12)$$

La clasificación correspondiente del CI está dada en la Tabla 3.

c) Coeficiente hidrotérmico de Selyaninov (HTC)

Este índice es útil para la vigilancia de las condiciones de sequía en la agricultura y también ha sido utilizado en clasificaciones climáticas, pues da una medida del abastecimiento de agua de la vegetación (Svoboda y Fuchs, 2017). Usa como variables la temperatura y precipitación y es flexible para usarse de manera decadal y mensual (Svoboda y Fuchs, 2017). La manera de calcularlo es la siguiente (Mesterházy et al., 2014):

$$HTC = \frac{10P}{T_0} \quad (13)$$

Donde:

P = Precipitación de temporada de crecimiento [mm]

T_0 = Grados días efectivos ($^{\circ}\text{C}$) (suma de la temperatura media diaria para los días en que ésta es mayor a 10°C durante la temporada de crecimiento). Los distintos rangos de HTC se muestran en la Tabla 3.

d) Precipitación de temporada de crecimiento (GSP)

Este índice es la suma de la precipitación durante la temporada de crecimiento (TC) que en nuestro hemisferio es de abril a octubre. El GSP es importante porque un déficit de éste podría provocar estrés hídrico en la planta y un exceso durante la TC favorece el desarrollo de hongos o plagas que pueden destruir a los cultivos de la vid, tales como el hongo *botrytis* o el oídio. La manera de calcular este índice es la siguiente:

$$GSP = \sum_{1\text{Abr}}^{31\text{Oct}} \text{Precipitación} \quad (14)$$

Cada uno de estos índices climáticos se presenta en forma de mapas climatológicos para el periodo histórico (1981-2010), el periodo futuro cercano (2021-2050) y lejano (2070-2099) y sus cambios proyectados bajo los escenarios de emisiones.

Tabla 3. Índices, sus clasificaciones de acuerdo con los diferentes umbrales, meses para el cálculo y referencias de las distintas métricas climáticas utilizadas para el análisis de las regiones vitícolas.

Índice	Clasificación	Meses	Referencia
Unidades Calor	Muy frío <850 Región I 850-1389 Región II 1389-1667 Región III 1667-1944 Región IV 1944-2222 Región V 2222-2700 Muy caliente >2700	Abr-Oct	Jones et al. (2010)
Índice de noches frías (CI)	Noches muy frías (CI+2) ≤12 Noches frías (CI+1) >12≤14 Noches templadas (CI-1) >14≤18 Noches cálidas (CI-2) >18	Sep	Tonietto y Carbonneau (2004)
Coficiente hidrotérmico de Selyaninov (HTC)	La producción de uva solo es posible si la humedad es alta o la irrigación se aplica ≤0.5 mm/°C Valor óptimo ~1 mm/°C Máximo valor de HTC 1.5-2.5 mm/°C	Abr-Oct	Mesterházy et al. (2014)
Precipitación de temporada de crecimiento (GSP)	Precipitación acumulada (mm)	Abr-Oct	Firth et al. (2017)

3.2.2 Áreas con aptitud vitivinícola

También se calcularon la frecuencia anual de regiones vitivinícolas de acuerdo con las UC y el porcentaje de áreas con aptitud vitivinícola. Para esto, se utilizó la metodología de Corrales-Suastegui et al., (2019) adaptada a las UC:

a) Frecuencia de regiones con aptitud vitivinícola

$$F = \frac{1}{30} \sum_{k=1}^{30} (AA_k) * 100 \quad (15)$$

Donde:

AA es la ocurrencia de condición vitícola en el año k. Para que una zona o un punto de malla sean aptos en un año, se debe cumplir que las UC estén dentro de los umbrales permitidos: $2700^{\circ}\text{D} \geq \text{UC} \geq 850^{\circ}\text{D}$. Entonces, $AA_k = 1$ para años en los que se cumple la condición y $AA_k = 0$ para años en los que no se cumple.

Para el gráfico espacial de esta variable se consideraron los puntos de malla que cumplieron por lo menos con el 60% de años con condiciones vitícolas, es decir, si un punto de malla no cumplió con los umbrales de las UCs en 18 años (de 30 del periodo), este se descartó y se blanqueó.

b) Cobertura de área con aptitud vitivinícola

$$A_k = \frac{1}{ta} \sum_{i=1}^p (AA_k^i) * 100, \quad (16)$$

Donde:

$i = 1, 2, \dots, p$ es el número de punto de malla

ta = número total de puntos de malla de los polígonos de los países analizados (México y EUA)

Con esto se obtuvo el porcentaje de área de las diversas bases de datos en el periodo histórico, así como en el futuro.

Capítulo 4. Resultados

4.1 Periodo histórico

A continuación se presentan los resultados para el periodo de referencia (1981-2010) a partir de las bases de datos de observaciones y la evaluación de las simulaciones climáticas regionales. En esta sección se describen los resultados de las climatologías de las temperaturas y precipitación, así como de los índices descritos en la Sección 3.2.1 a nivel nacional en el orden siguiente: temperatura media, unidades calor (UCs), precipitación de temporada de crecimiento (GSP), índice de noches frías (CI) y coeficiente hidrotérmico (HTC).

4.1.1 Temperatura media anual

Como se explicó en la Introducción (Fig.1), una característica de las regiones vitivinícolas es que se encuentran entre las isotermas anuales de 10 y 20°C. Para resaltar las regiones con temperaturas aptas en nuestra región de estudio, la Fig. 11 muestra las temperaturas medias anuales del periodo 1981-2010. De acuerdo con las observaciones de Livneh las regiones costeras de México son muy cálidas para el sector vitivinícola, ya que tienen temperaturas mayores a los 20°C. Baja California y las zonas montañosas del norte de México y el altiplano central, así como las zonas del sur y suroeste de Estados Unidos se encuentran entre las isoterma de 10°C y 20°C favorables para la vitivinicultura.

Por otro lado, el modelo regional RegCM forzado con ERA-Interim (Fig. 10b) captura el patrón general observado, pero expande las zonas no aptas para la viticultura (isotermas > 20°C), particularmente en Baja California Sur, Coahuila y el sureste de Estados Unidos. El altiplano tiene temperaturas entre 20°C a 12°C bajo esta simulación, mientras que Baja California muestra temperaturas más cálidas que las observadas. El re-escalamiento de RegCM con los modelos globales muestra un mejor comportamiento, aunque sigue habiendo un sesgo cálido en Baja California. Además, bajo estas simulaciones la isoterma de 10°C se ve más extendida en el suroeste y sur de EUA, en específico en la simulación con RegCM-GFDL (Fig. 11e). Estas diferencias se ven más claramente en la Fig. 12.

Las simulaciones con el modelo regional RCA muestran un mejor comportamiento de la isoterma de 20°C en México (última columna de la Fig. 11); por ejemplo, la evaluación con ERA-Int (Fig. 11g) muestra

un comportamiento muy similar a las observaciones de Livneh (Fig. 11a) en casi todo el altiplano central, Coahuila y Nuevo León, aunque en Baja California tiene un sesgo ligeramente cálido. En contraste, la isoterma de 10°C en el noroeste de EUA es más amplia en todas las simulaciones de RCA, es decir, es más frío, pero esto no afecta a las regiones vitivinícolas de preferencia, como las de California. El RCA también tiene un sesgo frío en la región más cálida de México, el Desierto de Sonora-Arizona. Los ensambles promedio de las simulaciones de RegCM-Ens (Fig. 11f) y RCA-Ens (Fig. 11k) representan mucho mejor las observaciones de Livneh (Fig. 11a) en México y California, pero con el sesgo frío en la zona fronteriza del Desierto de Sonora-Arizona y la región de Mexicali en el noreste de Baja California.

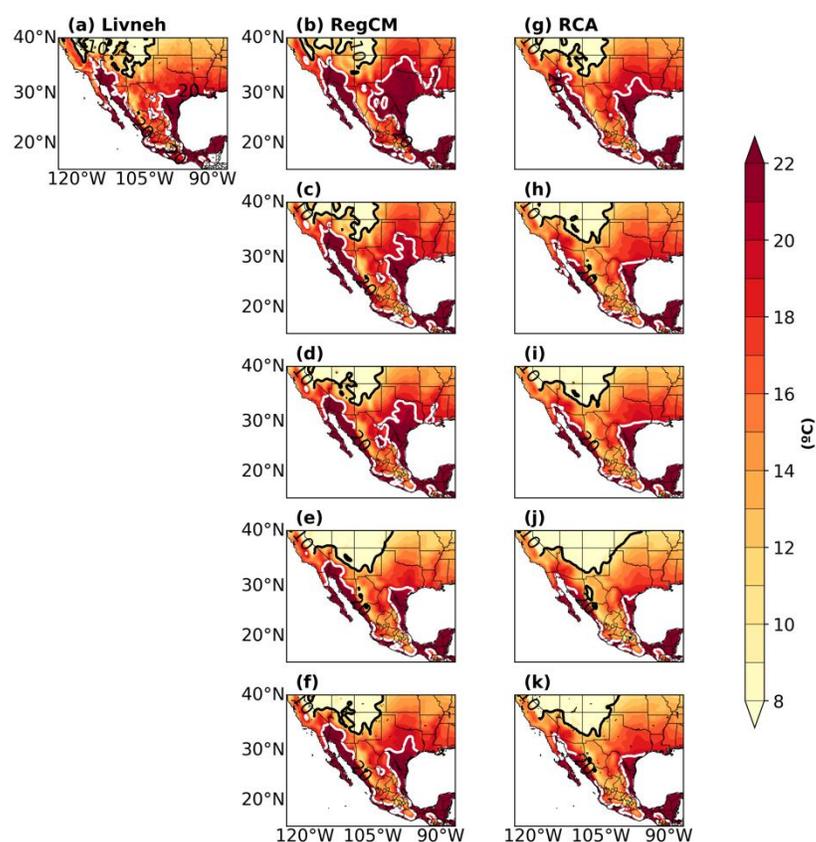


Figura 10. Temperatura media anual en el periodo histórico. Las isotermas negra y blanca son de 10°C y 20°C, respectivamente, de acuerdo con las diferentes bases de datos. (a) Livneh (observaciones), (b) RegCM-ERA, (c) RegCM-Had, (d) RegCM-MPI, (e) RegCM-GFDL, (f) RegCM-Ens, (g) RCA-ERA, (h) RCA-Had, (i) RCA-MPI, (j) RCA-GFDL, (k) RCA-Ens

En la Fig. 12 se observan los sesgos de temperatura de manera más clara; las anomalías de RegCM muestran un dipolo con una región más cálida en el norte del dominio incluyendo la Península de Baja California y más frío hacia el sur (Fig. 12a). En todas las simulaciones de RegCM (primera columna de la

Fig. 12) se observa que Baja California y California, los principales estados vitivinícolas de México y EUA, respectivamente, son muy cálidos, incluso en el ensamble promedio, mientras que el altiplano central de México es más frío. Sin embargo, en comparación con las simulaciones de RCA (segunda columna de la Fig. 12), el RegCM tiene sesgos más pequeños en el Altiplano, ya que el RCA es muy frío en casi todo el dominio, con excepción de Baja California y California donde los sesgos positivos son menores a los de RegCM. Por lo tanto, ambos modelos tienen incertidumbres en diferentes regiones que podrían reducirse un poco al hacer un ensamble de los dos.

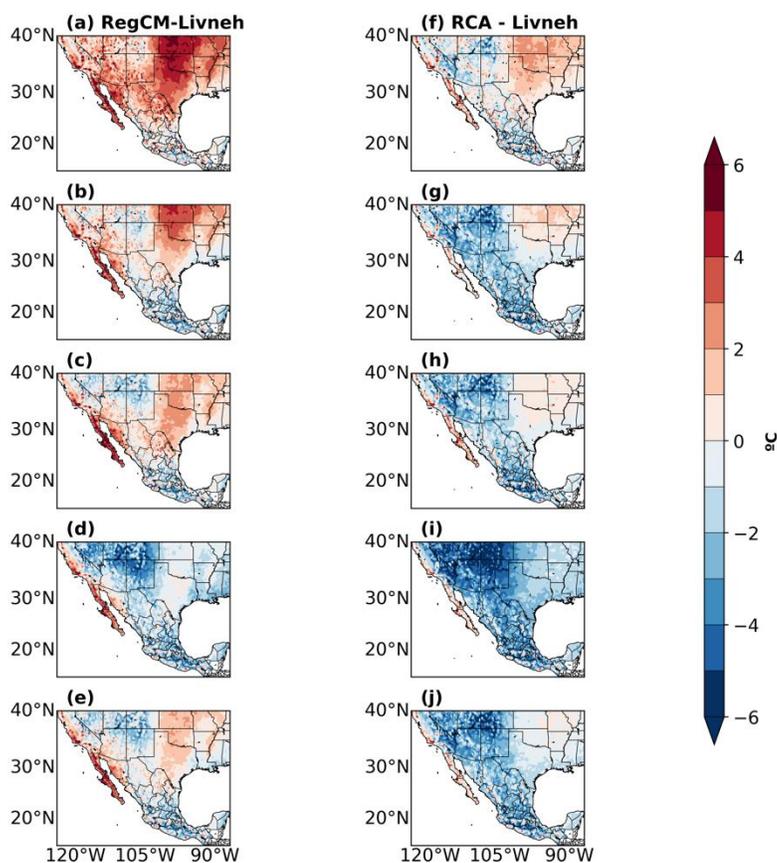


Figura 11. Sesgos de temperatura media anual en el periodo histórico de los dos modelos regionales relativos a las observaciones de Livneh. a) RegCMERA, b) RegCMHad, c) RegCMMPI, d) RegCMGFDL, e) RegCMEns, f) RCAERA, g) RCAHad, h) RCAMPI, i) RCAGFDL, j) RCAEns.

4.1.2 Climogramas

Otro factor importante de evaluar en las regiones vitivinícolas es el climograma de temperatura y precipitación porque su influencia conjunta es clave para el desarrollo de la uva. Por ejemplo, cuando la

precipitación mensual es igual o está por arriba de la temperatura media en los climogramas de la Fig. 13 significa que la tierra tiene suficiente humedad, de lo contrario significa que las vides podrían necesitar riego. En el altiplano las lluvias ocurren en verano y varios meses pueden estar por arriba de la temperatura media en los climogramas; esto también puede ser un problema porque demasiada humedad puede generar algunas plagas.

De acuerdo con Livneh, en la zona de las Californias (Cal) la temperatura máxima media (T_{max}) se observan en el mes de agosto y la mínima (T_{min}) en diciembre y enero; la temperatura media (T_{med}) alcanza valores de hasta 20°C , también en agosto. De acuerdo con las observaciones de Chirps, la precipitación de esta región es del tipo Mediterráneo con muy poca lluvia de abril (~ 27 mm) a octubre (~ 22 mm), meses en los que se da el crecimiento de la vid; la precipitación máxima (~ 102 mm) ocurre entre diciembre y marzo, es decir en la temporada invernal y de dormancia de la vid. El clima mediterráneo se caracteriza por altas temperaturas y pocas lluvias durante primavera y verano, además de bajas temperaturas y máxima precipitación en invierno. La precipitación media anual en esta región es 265.7 mm.

El clima de la región vitivinícola de Coahuila en el altiplano norte es del tipo continental semiárido con lluvias de verano; la T_{min} media se observa entre diciembre y enero ($\sim 10^{\circ}\text{C}$), mientras que la T_{max} media se alcanza en el mes de mayo ($\sim 30^{\circ}\text{C}$), antes de las lluvias de verano. La T_{med} tiene un máximo de 20°C en el mes junio. La precipitación máxima ocurre en julio (~ 80 mm) y la mínima en marzo (~ 5 mm). La precipitación media anual es 418.4 mm.

La región vitivinícola de Nuevo León es muy reciente y con muy poca producción de uva como se vio en la Tabla 1; se localiza al este de la Sierra Madre Oriental y tiene temperaturas mayores a las de Coahuila y Baja California. La T_{max} media se alcanza en el mes de Agosto (35°C) y, como se puede ver en la Fig. 13, la temperatura tiene un comportamiento de campana, con máximas en el verano. La T_{med} tiene valores máximos de $\sim 27^{\circ}\text{C}$, mientras que la T_{min} media alcanza valores mínimos de $\sim 6^{\circ}\text{C}$. Por otro lado, la precipitación tiene máximos en junio y septiembre con un ligero comportamiento de canícula. Con una precipitación media anual de 727.7 mm es la región vitivinícola más lluviosa de México.

Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro y Zacatecas, al igual que Coahuila, se localizan en el altiplano y tienen clima continental semiárido; por lo tanto, muestran un comportamiento similar de temperaturas y precipitación. La T_{max} también se observa en Mayo ($\sim 30^{\circ}\text{C}$), mientras que la T_{min} ocurre entre diciembre y enero, habiendo valores promedio de hasta 4°C en Aguascalientes y Zacatecas. La T_{med} oscila entre los

20 a 10°C, valores idóneos para que se dé una acumulación de calor adecuada para la vid, como se verá en la siguiente sección. La precipitación tiene un máximo en julio (~140 mm en Querétaro) y después comienza a descender, siendo mínima en el periodo de dormancia de la vid. La precipitación media anual en estas regiones es 506.8 mm.

A partir de este análisis se hizo una regionalización de acuerdo a las características climáticas de las regiones vitivinícolas, la cual se muestra en la Tabla 4. Las Californias (Cal) está formada por Baja California y California EUA y se caracterizan por tener un clima mediterráneo y las mejores condiciones para este sector por sus lluvias de invierno y con las unidades de calor más bajas en promedio (UC = 1790 °D). Este factor favorece a la región preferente de vinos en caso de que las temperaturas sigan aumentando en el futuro, ya que el límite aproximado de las UCs para las regiones aptas para la vitivinicultura es 2700 °D. Las zonas del Altiplano Central (Aguascalientes, Guanajuato, Zacatecas y Querétaro) y el Altiplano Norte (Coahuila) tienen un clima continental semiárido con UCs ligeramente mayores (entre 1800 y 2000 °D), mientras que el noreste (Nuevo León) es la región más cálida con más de 3000 °D.

La zona del Altiplano Norte (Coahuila) tiene una altura media de 1595.7 msnm (Fig. 13 y Tabla 4) por lo que las temperaturas son del rango o similares a las de las Californias. El Noreste, aunque tiene Tmax más altas que el resto de las regiones, se caracteriza por tener una vendimia más temprana (principios de junio), ya que como se puede ver en el climograma (Fig. 13), la temperatura mínima de 10°C (que da inicio a la temporada de crecimiento o acumulación de calor para que se desarrolle la vid) se alcanza en el mes de febrero, mientras que en las otras regiones es en abril.

En la Fig. 13a también se muestran los climogramas de acuerdo con la simulación de evaluación del modelo regional RCA forzado con ERA (RCA-ERA); el patrón de las temperaturas medias es buena, pero en la zona del altiplano RCA-ERA subestima la Tmax y la Tmed, como era de esperarse por el sesgo frío que se observó en la Fig. 12. El modelo simula bien el ciclo anual de temperatura en la zona de las Californias (Cal), aunque el sesgo es positivo en la Tmed (Fig. 13a, línea verde punteada). RCA-ERA subestima la temporada principal de lluvias en otoño-invierno. Por el contrario, el modelo sobrestima significativamente la precipitación (barras rojas) de verano en todos los estados con excepción de Aguascalientes.

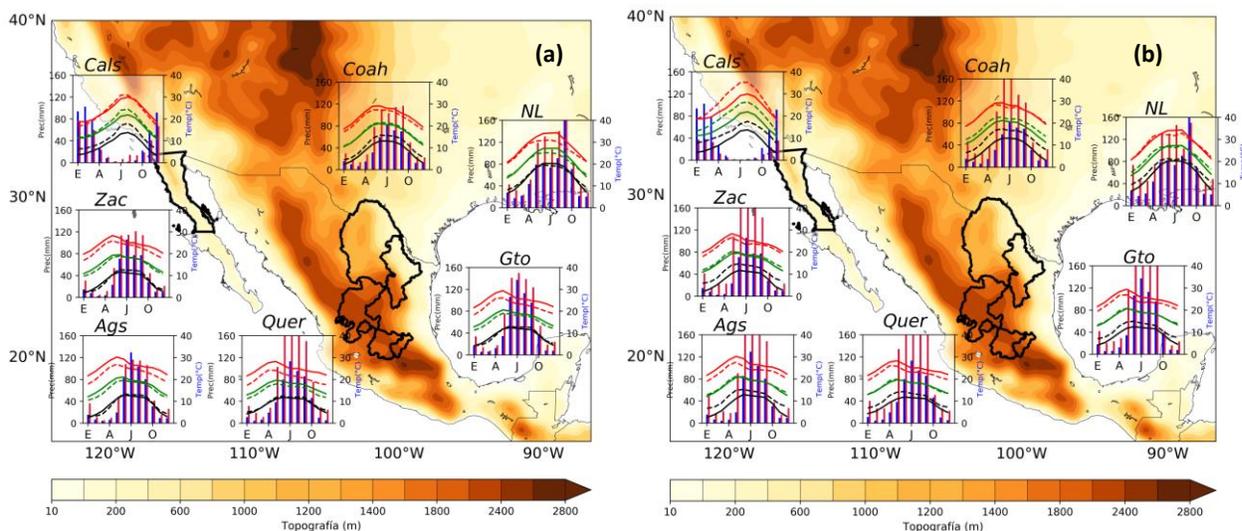


Figura 12. Climogramas de las regiones vitivinícolas de los siete estados analizados. Las curvas son Tmax, Tmed y Tmin y las barras son la precipitación mensual. Las líneas continuas son las observaciones con Livneh y las punteadas son de los modelos regionales (a) RCA-ERA y (b) Reg-ERA. Las barras azules son observaciones con CHIRPS y las rojas son de RCA-ERA en (a) y con Reg-ERA en (b). Cals: Californias (Baja California y California, EUA), Coah: Coahuila, NL: Nuevo León, Zac: Zacatecas, Ags: Aguascalientes, Quer: Querétaro y Gto: Guanajuato.

En la Fig. 13b se muestra la comparación de los climogramas de RegCM y las observaciones. En la región de las Californias RegCM sobrestima la Tmax y Tmin, mientras que la precipitación es menor que la observada. En la región del altiplano RegCM simula bien la temperatura, a excepción de Aguascalientes donde la Tmax se sobrestima más que en los otros estados; en la temporada seca invernal, el modelo simula bien la precipitación, mientras que en el verano es mayor que las observaciones.

En Coahuila el modelo captura bien el ciclo anual de Tmax y Tmed, pero sobrestima la Tmin. El modelo también sobrestima la precipitación en toda la temporada de crecimiento, aunque tiene menos errores en octubre y diciembre. En el Noreste la temperatura y la precipitación muestran patrones similares a las observaciones, aunque en los meses de mayo, junio y julio se sobrestima.

Tabla 4. Resumen de las cuatro regiones vitivinícolas de acuerdo con el clima. Se muestra el promedio de las temperaturas y de las unidades calor (UC) de la temporada de crecimiento (abril-octubre), así como la precipitación anual con datos de observaciones de cada región (ver Fig. 13). En Baja California los datos son de Clicom y en las demás regiones los datos de temperaturas son de Livneh, mientras que los de precipitación son de Chirps.

Región	Clima	Altitud (msnm)	Tmax Abr-Oct (°C)	Tmin Abr-Oct (°C)	Tmed Abr-Oct (°C)	Prec Anual (mm)	UC (°D)
Las Californias: Baja California y California, EUA	Mediterráneo	202.3	28.3	11.3	19.7	265.6	1790.1
Altiplano Central: Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro y Zacatecas	Continental Semiárido	1978.6	26.3	10.7	18.6	506.8	1874.3
Altiplano Norte: Coahuila		1595.7	27.3	11.4	19.4	418.4	2045.1
Noreste (NE): Nuevo León		532.3	31.9	18.2	25.1	727.7	3107.3

4.1.3 Unidades Calor 1981-2010

Como se vio en la Sección 3.2.1, las UCs son importantes para el desarrollo de la uva, lo que permite conocer qué lugares son aptos para la vid y qué variedades son las que podrían darse mejor en una región. En la Fig. 14 se muestran las UC a partir de observaciones y simulaciones durante la temporada de crecimiento (Abr-Oct) del periodo histórico. Las observaciones de Livneh (Fig. 14a) muestran claramente las regiones actuales vitivinícolas de México en las regiones semiáridas del altiplano central mexicano, así como la región de clima mediterráneo en Baja California, regiones que se encuentran entre los umbrales de 850 y 2700 °D. El mapa también muestra regiones con aptitud vitivinícola en el suroeste y centro de Estados Unidos y en California.

La simulación de evaluación de RegCM (Fig. 14b) forzado con ERA Interim muestra valores y patrones espaciales similares a Livneh (Fig. 14a), pero sobreestima las UC en Baja California y simula un área de aptitud más reducida en el altiplano mexicano, lo que sugiere que posiblemente el modelo forzante (ERA)

es más caliente que las observaciones en el periodo de referencia. Esto se ve más claro en los experimentos de RegCM forzado por los modelos globales (columna izquierda de la Fig. 14), los cuales simulan patrones espaciales más cercanos a Livneh (Fig. 14a) especialmente en el altiplano, aunque en Baja California los experimentos siguen siendo más cálidos que las observaciones. Por lo tanto, las simulaciones de RegCM tienen un sesgo positivo significativo en las regiones vitivinícolas de Baja California y California, como se ve más directamente en la Fig. 15. Estos patrones espaciales de los sesgos de las UC reflejan parcialmente la influencia de los sesgos de la Tmed anual de los modelos que se vieron en la Fig. 12.

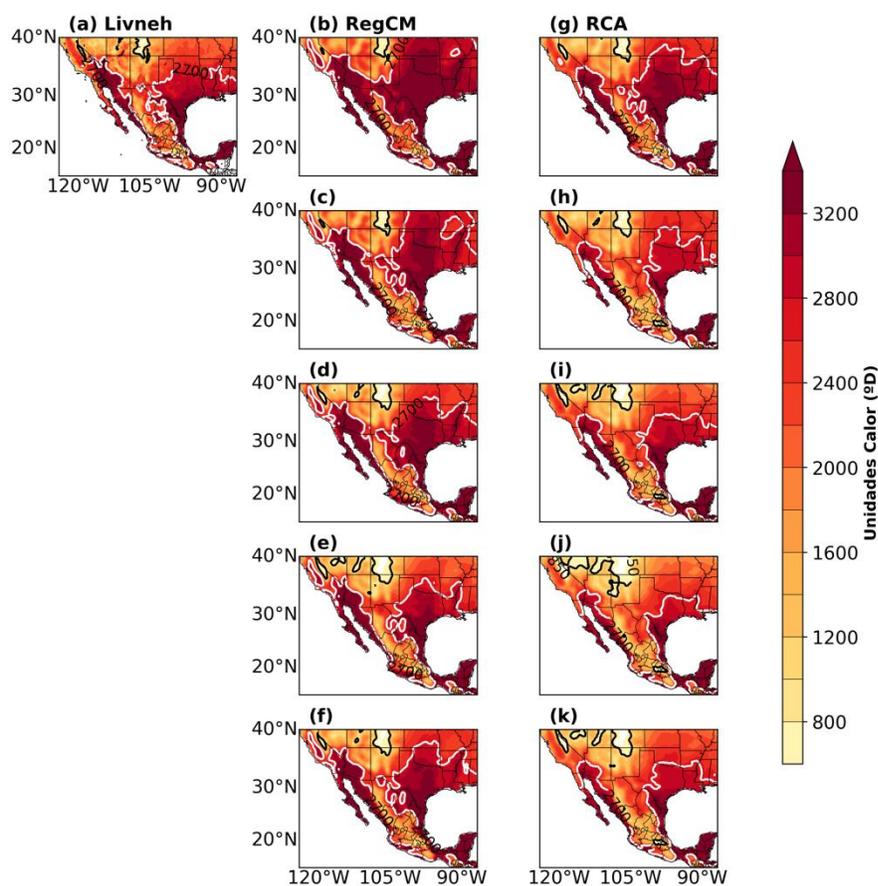


Figura 13. Unidades Calor de acuerdo con las observaciones de Livneh y los dos modelos regionales forzados con tres modelos globales y sus ensambles promedio (Ens). La isolínea negra es el umbral inferior de 850°D, mientras que la blanca es el umbral superior de de 2700°D. (a) Livneh, columna izquierda: (b) RegCM-ERA, (c) RegCM-Had, (d) RegCM-MPI, (e) RegCM-GFDL, (f) RegCM-Ens; y columna derecha: (g) RCA-ERA, (h) RCA-Had, (i) RCA-MPI, (j) RCA-GFDL, (k) RCA-Ens.

Por otro lado, la simulación de evaluación de RCA muestra un patrón espacial muy similar a Livneh (Fig. 14g y 15g) en los estados del altiplano central, Chihuahua y Baja California; al norte de Coahuila muestra

un ligero sesgo positivo. Las simulaciones de RCA forzado con los modelos globales (Fig. 15h-j) tienen un mejor comportamiento, aunque tienen un sesgo negativo en casi todo el dominio (Fig. 16), similar a las Tmed (Fig. 12). El mayor sesgo negativo se ve en la simulación de RCA con GFDL (Fig. 14j y 15j), incluso en la zona montañosa de EUA el patrón espacial tiene valores de 850°D en el este. RCA tiene un sesgo mayormente frío en los estados del altiplano en todas las simulaciones (Fig. 15f-j) y un sesgo cálido en la Península de Baja California. El sesgo frío es menos marcado en la simulación de evaluación (Fig. 15f). El RCA-Had (Fig. 15g) tiene un menor sesgo positivo en Baja California Sur y en Baja California.

En resumen, RegCM es muy caliente en Baja California y California y RCA es más frío en el altiplano que RegCM. Por lo que una combinación de los dos modelos podría equilibrar las simulaciones y las proyecciones.

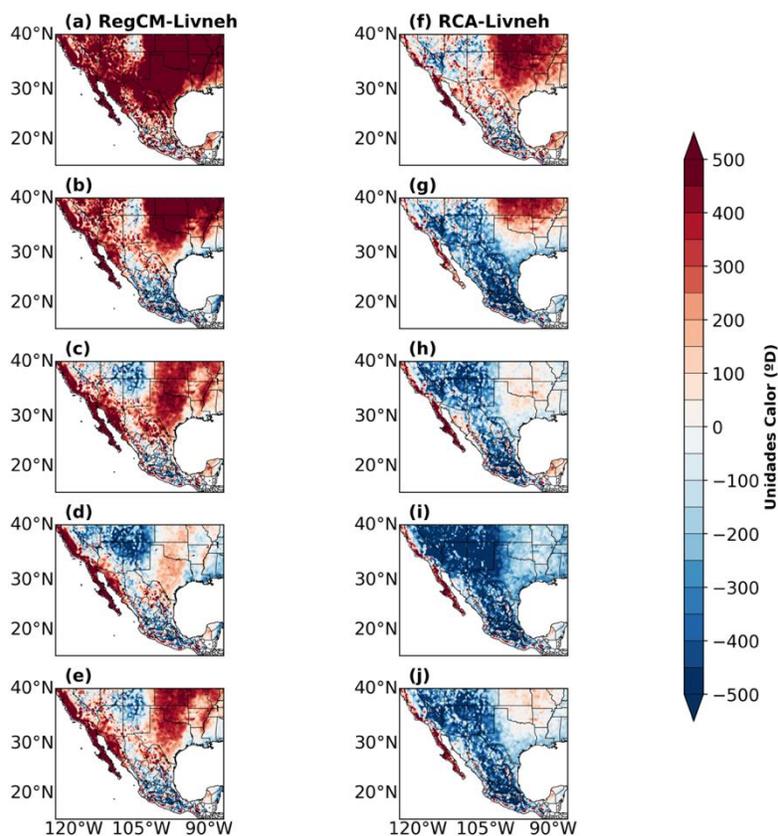


Figura 14. Sesgos de Unidades Calor de los dos modelos regionales relativos a las observaciones de Livneh para el periodo 1981-2010. Columna izquierda: (a) RegCM-ERA, (b) RegCM-Had, (c) RegCM-MPI, (d) RegCM-GFDL, (e) RegCM-Ens; y columna derecha: (f) RCA-ERA, (g) RCA-Had, (h) RCA-MPI, (i) RCA-GFDL, (j) RCA-Ens.

4.1.4 Precipitación de la temporada de crecimiento (GSP) 1981-2010

En la Fig. 16 se muestran las GSP de las observaciones de Livneh y Chirps y de las simulaciones de ambos modelos. Livneh y Chirps muestran un patrón similar con un límite máximo de 600 mm en la región de

monzón en el Noroeste de México, el cual sigue a la Sierra Madre Occidental hacia el centro de México y luego hacia el norte por la Sierra Madre Oriental, creando una sombra orográfica con un mínimo en el altiplano mexicano. Sin embargo, el altiplano es más húmedo que las Californias donde las precipitaciones son menores a 300 mm.

El RegCM tiene en general un patrón húmedo en el altiplano como se observa en las isoyetas de la evaluación del modelo con ERA (Fig. 16c). Las simulaciones con Had, MPI, GFDL y el ensamble (Ens) promedio (Fig. 16d, e y g) muestran el mismo patrón húmedo en la zona montañosa del oeste de México, esto se ve mejor en la Fig. 17b, c, d y e, pero el GFDL es el más húmedo (Fig. 17d), donde incluso en Baja California hay valores de ~ 200 a 300 mm.

Por otro lado, la evaluación de RCA muestra mayor detalle regional en las isoyetas de 600 y 300 mm, especialmente en la zona montañosa del oeste y este de México, así como en el sur de EUA (Fig. 16, columna derecha). La mayor sensibilidad del modelo en las zonas de topografía compleja (mayor detalle) puede deberse a la interpolación de 50 a 25 km para poder compararlo con RegCM. Este patrón se repite en todas las simulaciones, a excepción del GFDL. En la zona montañosa de Baja California, RCA forzado con

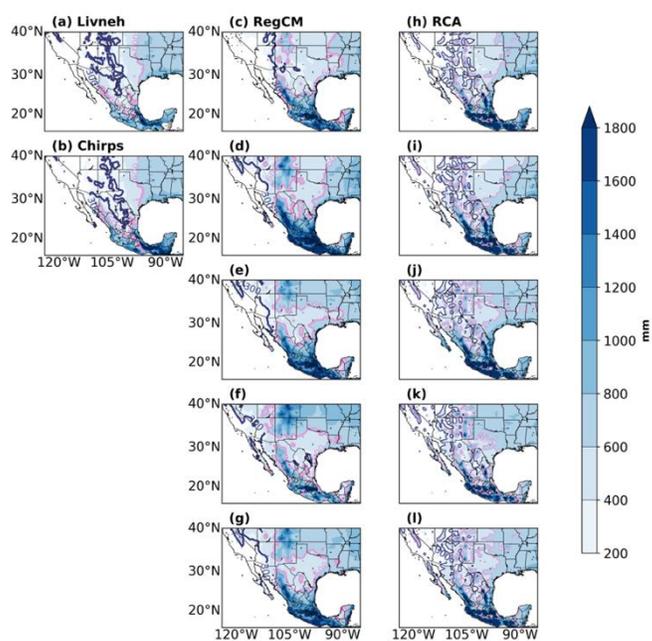


Figura 15. Precipitación de la temporada de crecimiento (GSP) de las observaciones (Livneh y Chirps) y de los dos modelos regionales (RegCM y RCA). La isoyeta azul oscuro es de 300 mm, mientras que la rosa es de 600 mm. Columna izquierda (a) Livneh y (b) Chirps; columna central: (c) RegCM-ERA, (d) RegCM-Had, (e) RegCM-MPI, (f) RegCM-GFDL, (g) RegCM-Ens; y columna derecha: (h) RCA-ERA, (i) RCA-Had, (j) RCA-MPI, (k) RCA-GFDL y (l) RCA-Ens.

El MPI es muy húmedo (Fig. 16j y 17j), y la simulación con GFDL (Fig. 16i) tiene un mejor comportamiento en los estados del altiplano, como Aguascalientes y Querétaro. En Nuevo León el patrón húmedo se repite con todas las simulaciones excepto con GFDL. En resumen, la zona de las Californias es más seca que el altiplano y el Noreste de México, como ya se había visto en los climogramas (Fig. 13 y en la Tabla 4); la precipitación de las Californias la captura mejor el modelo Reg-Had y RCA-Had (Fig. 17b y 17g), mientras que RCA-Had captura mejor el patrón del altiplano. Además, RCA tiene sesgos de precipitación más pequeños en el altiplano que RegCM, pero también es más frío que RegCM (Figs. 11, 12 y 13). Por lo tanto, ambos modelos tienen sesgos según la variable y región que se analice.

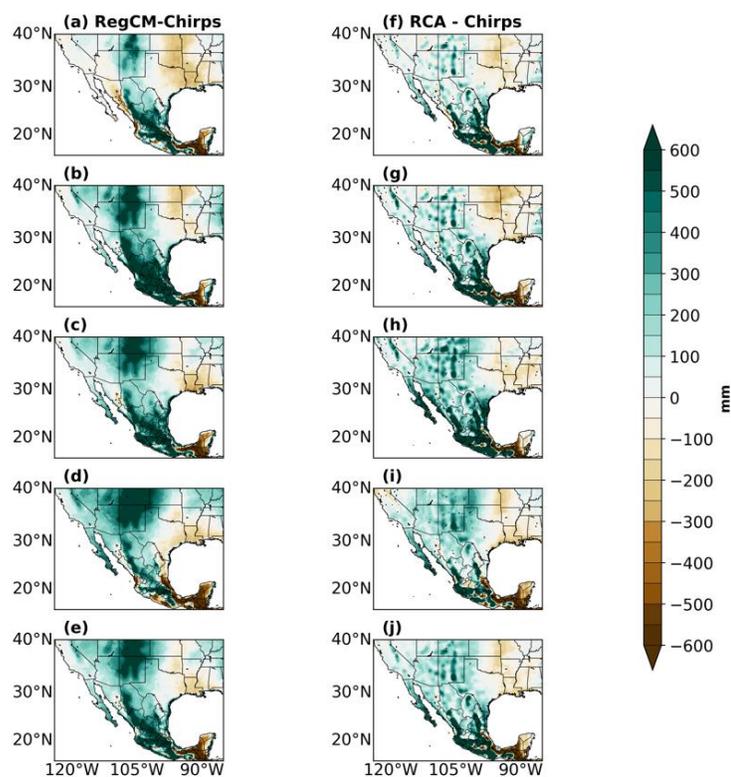


Figura 16. Sesgos de la precipitación de la temporada de crecimiento (GSP) relativos a las observaciones de Chirps. Columna izquierda: (a) RegCM-ERA, (b) RegCM-Had, (c) RegCM-MPI, (d) RegCM-GFDL, (e) RegCM-Ens; y columna derecha: (f) RCA-ERA, (g) RCA-Had, (h) RCA-MPI, (i) RCA-GFDL y (j) RCA-Ens

4.1.5. Índice de noches frías (CI) 1981-2010

De acuerdo con la clasificación de noches frías de septiembre (CI, por sus siglas en inglés “cool night index”) en la Tabla 3 y con las observaciones de Livneh (Fig.18a), en Baja California y gran parte del altiplano Mexicano y el Suroeste de Estados Unidos el CI es muy frío ($< 12^{\circ}\text{C}$); en Coahuila y en el lado oriental de Sonora las noches son frías, con rangos entre 12 a 14°C . En las Fig. 18 y 19 se ve claramente que todas las

simulaciones de RegCM son mucho más calientes que las de RCA. En general, las simulaciones capturan mejor el CI en el altiplano que en Baja California, y RCA tiene sesgos más pequeños que RegCM como puede verse en la Fig. 19; los sesgos con RegCM son de hasta 6°C en California y Baja California.

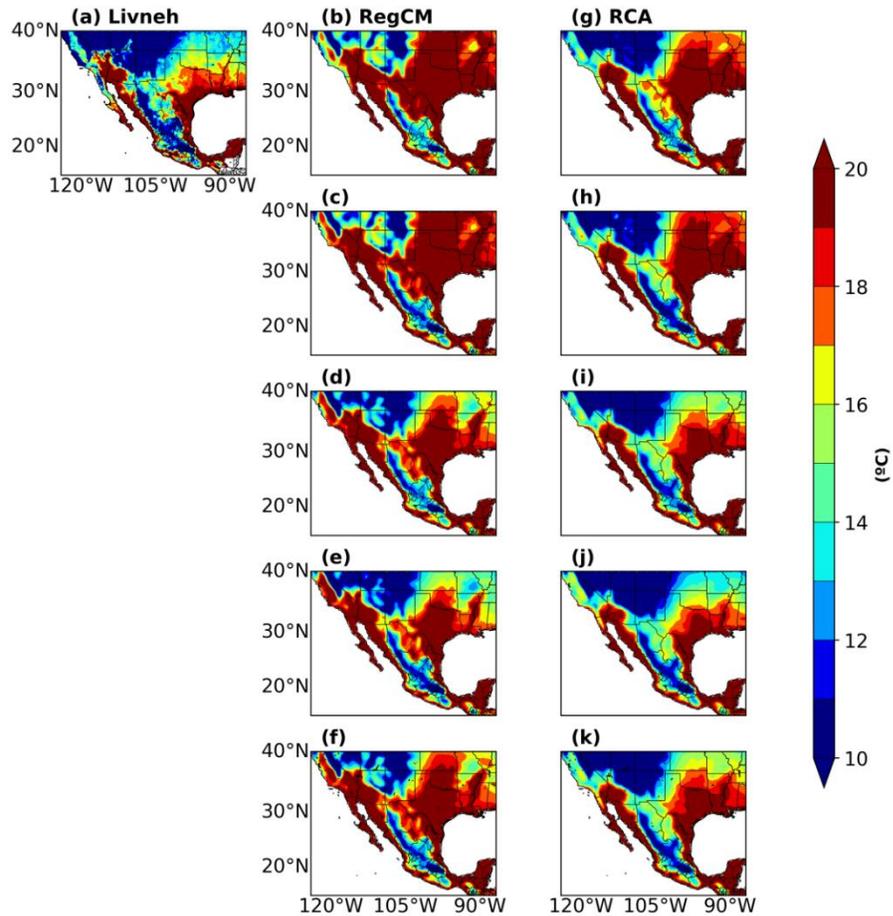


Figura 17. Índice de noches frías (CI) de los dos modelos regionales. (a) Observaciones de Livneh; columna izquierda: (b) RegCM-ERA, (c) RegCM-Had, (d) RegCM-MPI, (e) RegCM-GFDL, (f) RegCM-Ens; y columna derecha: (g) RCA-ERA, (h) RCA-Had, (i) RCA-MPI, (j) RCA-GFDL, (f) RegCM-Ens; y columna derecha: (g) RCA-ERA, (h) RCA-Had, (i) RCA-MPI, (j) RCA-GFDL y (k) RCA-Ens.

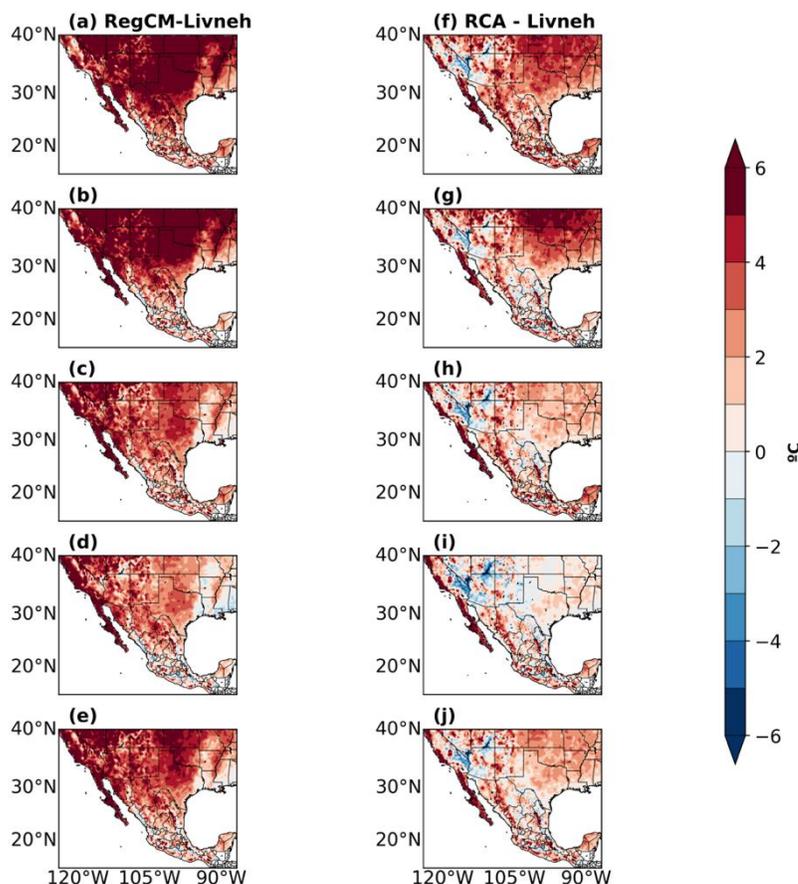


Figura 18. Sesgos de índice de noches frías (CI) relativos a las observaciones de Livneh. Columna izquierda: (a) RegCM-ERA, (b) RegCM-Had, (c) RegCM-MPI, (d) RegCM-GFDL, (e) RegCM-Ens; y columna derecha: (f) RCA-ERA, (g) RCA-Had, (h) RCA-MPI, (i) RCA-GFDL, (j) RCA-Ens.

4.1.6 Coeficiente hidrotérmico (HTC) 1981-2010

Como se vio en la sección 4.1.2, la combinación adecuada de temperatura y precipitación es importante para determinar los periodos del año óptimos para el crecimiento de la vid y la disponibilidad de agua en meses específicos. El HTC (definido en la Tabla 3 como $10P/T$ durante el periodo de crecimiento) agrega información espacial sobre el clima regional porque cuando los valores de este índice son cercanos a $1 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$ se considera como una combinación óptima de temperatura y precipitación para la viticultura (Mesterházy et al., 2014), mientras que valores menores a $0.5 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$ significan que la región podría necesitar riego y los valores entre 1.5 y $2.5 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$ son los límites máximos adecuados para la viticultura (Tabla 3). En la Fig. 20 las observaciones de Livneh muestran valores $\leq 0.5 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$ en la región de las Californias, mientras que en el altiplano norte y central los valores son de entre 1 a $2 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$ y en el sur de Nuevo León, la región más húmeda y caliente, el HTC tiene valores de $\sim 2.5 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$.

Las simulaciones con RegCM tienen valores altos de HTC en casi todo el altiplano siendo Had, MPI y el Ens las más sobrestimadas (Fig. 20 y 21c, d y f), esto debido a que todas las simulaciones de RegCM son muy húmedas en el altiplano (Fig. 17). En Baja California la simulación de evaluación (Fig. 20 y 21b) muestra valores muy bajos, menores a $0.1 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$, ya que RegCM además es muy caliente en las Californias (Fig. 12). La simulación con Had, MPI y Ens muestran un mejor comportamiento en la zona de las Californias, mientras que el GFDL sobrestima ligeramente este índice en la zona montañosa de Baja California (Fig. 21e). La simulación de evaluación de RCA (Fig. 21f) muestra un ligero sesgo positivo ($\sim 0.2 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$) en la zona montañosa de Baja California. El resto de las simulaciones (Fig. 21g, h, i y j) muestran un patrón similar en esta zona, y en el altiplano central tienen un sesgo positivo en las zonas más altas (Fig. 21f, g, h, i y j), esto debido al sesgo positivo de precipitación que presenta este modelo. Como ya se había visto en los sesgos de las simulaciones espaciales de temperatura y precipitación el Reg-Had y el RCA-Had parecen las mejores simulaciones; con el HTC se observa lo mismo en la Fig. 21, ambos tienen los errores más pequeños en las Californias y el RCA-Had es el que muestra los sesgos más pequeños en el Altiplano.

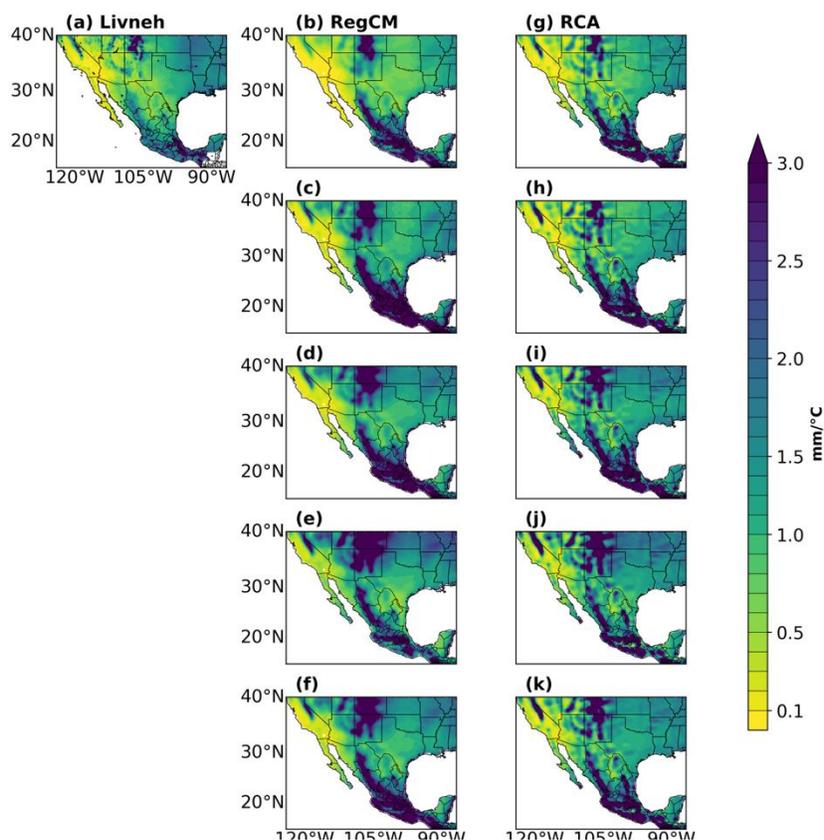


Figura 19. Coeficiente hidrotérmico de la temporada de crecimiento (HTC) de los dos modelos regionales y las observaciones de Livneh. (a) Livneh; columna izquierda: (b) RegCM-ERA, (c) RegCM-Had, (d) RegCM-MPI, (e) RegCM-GFDL y (f) RegCM-Ens; columna derecha: (g) RCA-ERA, (h) RCA-Had, (i) RCA-MPI, (j) RCA-GFDL y (k) RCA-Ens.

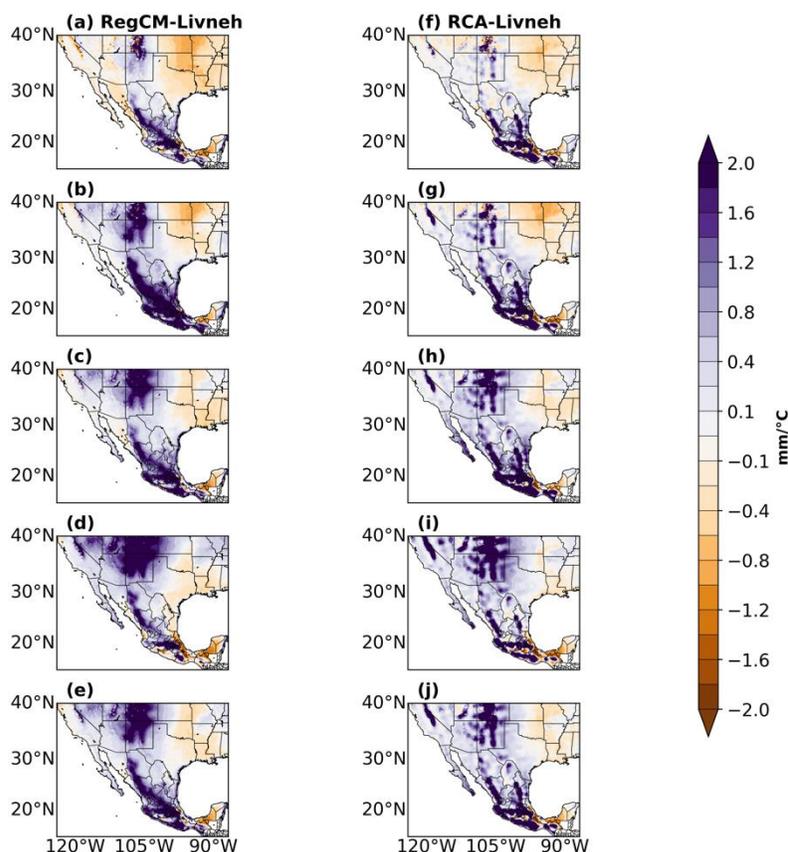


Figura 20. Sesgos de coeficiente hidrotérmico de la temporada de crecimiento (HTC) relativos a las observaciones de Livneh. Columna izquierda: (a) RegCM-ERA, (b) RegCM-Had, (c) RegCM-MPI, (d) RegCM-GFDL y (e) RegCM-Ens; columna derecha: (f) RCA-ERA, (g) RCA-Had, (h) RCA-MPI, (i) RCA-GFDL y (j) RCA-Ens.

4.1.7 Frecuencia de regiones y cobertura de área con aptitud vitivinícola 1981-2010

La frecuencia y cobertura de áreas de las regiones con aptitud vitivinícola se describieron en la Sección 3.2.2 y en las ecuaciones 13 y 14. Para que una zona o un punto de malla se considere apto en un año, las UCs deben de estar dentro de los umbrales permitidos: $2700^{\circ}\text{D} \geq \text{UC} \geq 850^{\circ}\text{D}$. Aunque como se vio en las secciones anteriores, hay diferentes factores climáticos que determinan la aptitud vitivinícola, pero aquí se usaron las UCs como una aproximación.

De acuerdo con las observaciones de Livneh (Fig. 22a), la máxima frecuencia anual (100%) con condiciones adecuadas para la viticultura en el periodo analizado se presenta en gran parte del altiplano, Baja California, California, Chihuahua, al suroeste de Nuevo León, al oeste de Coahuila y parte de Sonora (las zonas en color rojo). Hay lugares que sólo el 80% de los años fueron adecuados, como puede verse al sureste de EUA o en algunas zonas al sur de California.

Esto es diferente en la evaluación con RegCM (Fig. 22b), donde sólo zonas de California y de Baja California son aptas durante todo el periodo histórico. La simulación con Had (Fig. 22c) captura un poco mejor la zona de Baja California y de Chihuahua, aunque la frecuencia es de ~72 a 76% de años con condiciones aptas. El altiplano central es capturado de manera correcta en todas las simulaciones de ReGCM. La simulación con GFDL y el Ens (Fig. 22e y f) muestran un comportamiento similar a Livneh en el oeste de Coahuila.

RCA tiene un patrón más similar a Livneh en la corrida de evaluación, ya que como se ve en la Fig. 22g, Baja California muestra 100% de frecuencia como zona vitícola, así como el altiplano, el oeste de Coahuila, sur de Nuevo León y parte de Chihuahua (y una zona, al este, muestra entre 68 a 72% de frecuencia). Las simulaciones de RCA con los tres modelos globales y el Ens (Fig. 22h, i, j y k) muestran una sobrestimación en Chihuahua y Coahuila, pero capturan muy bien la zona de las Californias.

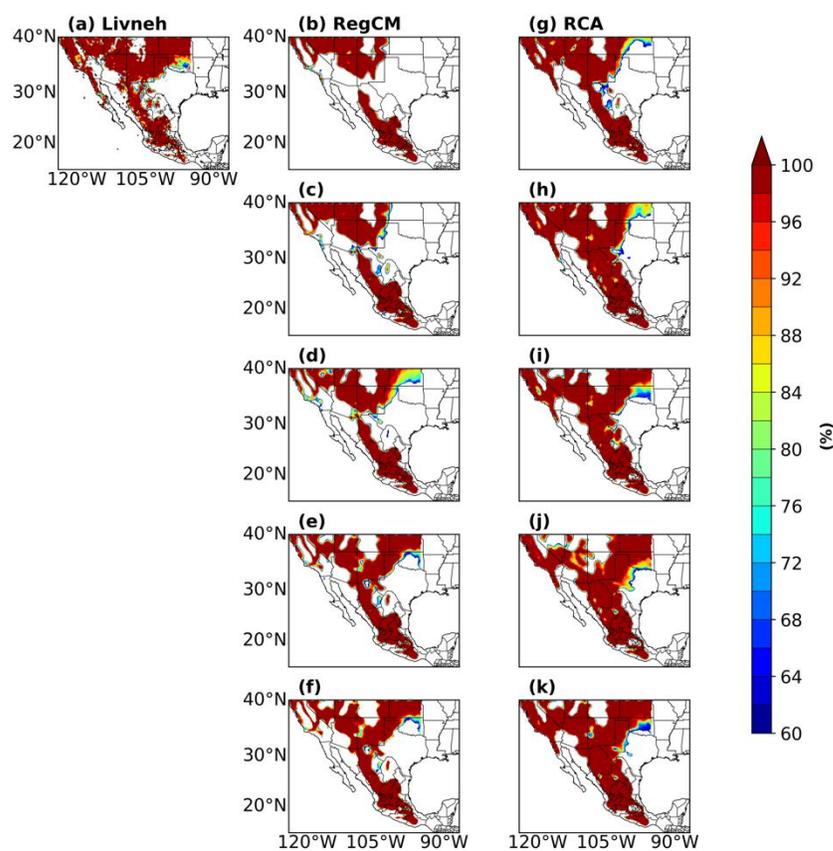


Figura 21. Frecuencia de área con aptitud vitivinícola (en % de años durante 1981-2010) de los dos modelos regionales y las observaciones de Livneh. (a) Livneh; columna izquierda: (b) RegCM-ERA, (c) RegCM-Had, (d) RegCM-MPI, (e) RegCM-GFDL y (f) RegCM-Ens; columna derecha: (g) RCA-ERA, (h) RCA- Had, (i) RCA-MPI, (j) RCA-GFDL y (k) RCA-Ens.

La cobertura promedio con aptitud vitivinícola, según las UCs, en México y Estados Unidos en la base de observaciones de Livneh es de 23.3% durante el periodo histórico. La evaluación de RegCM muestra un porcentaje de sólo 14.4%, y el ensamble de los modelos globales muestra una cobertura de 18.8%. El modelo GFDL (Tabla 5) tiene un mejor comportamiento de la cobertura de área, pues el porcentaje es de 20.6%, un valor cercano al de Livneh. La simulación de evaluación de RCA tiene un valor muy cercano al de las observaciones de Livneh, 20.4% (Tabla 5), mientras que el resto de las simulaciones de RCA con los modelos globales muestran una ligera sobrestimación. En general, RCA tiene captura mejor las áreas de aptitud que el RegCM, como ya se había visto en las otras variables, aunque tiene la desventaja de ser más frío en el altiplano.

Tabla 5. Porcentaje anual promedio y desviación estándar (std) de cobertura de área apta para la vitivinicultura en México y Estados Unidos de acuerdo con las Unidades de Calor de Livneh, RegCM y RCA durante 1981-2010.

Base de datos	Promedio (%)	Std
Livneh (Obs)	23.30	0.458
RegCM-ERA	14.43	0.348
RegCM-Had	17.33	0.768
RegCM-MPI	18.36	0.983
RegCM-GFDL	20.63	0.582
RegCM-Ens	18.77	0.596
RCA-ERA	20.44	0.685
RCA-Had	25.07	0.717
RCA-MPI	24.35	0.655
RCA-GFDL	25.89	0.497
RCA-Ens	24.84	0.443

4.2 Periodos futuros: NF (2021-2050) y FF (2070-2099)

En esta sección se muestran el análisis climático y los cambios esperados del clima regional de acuerdo con los escenarios de bajas (RCP2.6) y altas (RCP8.5) emisiones para el futuro cercano (NF) y el futuro lejano (FF).

4.2.1 Climatologías diarias de temperatura

En la Fig. 23 se muestran las climatologías diarias de temperatura bajo el escenario de bajas emisiones para las regiones vitivinícolas de los siete estados usando el modelo RegCM. En los climogramas históricos mensuales que se mostraron en la Fig. 13b (Sección 4.1.2), el RegCM sobrestimó las temperaturas media y máxima (entre 1 y 2°C) en casi todas las regiones. En los escenarios futuros, la Tmax de los ensambles muestra un aumento generalizado entre 1 a 2°C, especialmente durante la temporada de crecimiento (TC); en el invierno los cambios son menores. También se ve que la Tmin podría tener un aumento ligeramente mayor que la Tmax en Coahuila, pero los patrones de temperatura del futuro cercano y lejano son muy similares bajo este escenario. El inicio de la TC en todos los estados podría adelantarse ligeramente, pues el umbral de 10°C de la Tmin y el de 22°C de la Tmax se alcanzan a finales y principios de marzo, respectivamente.

La Fig. 24 muestra las climatologías históricas y los escenarios de las temperaturas diarias ante bajas emisiones, similar a la Fig. 243 pero con el modelo RCA. En las Figs. 12 y 13a se mostró que el RCA subestimó las temperaturas observadas, especialmente en el altiplano. Por ejemplo, aquí se ve que en el inicio típico de la temporada de crecimiento (en abril), las Tmin son mucho menores a 10°C tanto en el periodo histórico como en los escenarios futuros en todos los estados, excepto en Nuevo León. Debido al sesgo frío de este modelo durante el periodo histórico, aquí se explican sólo los cambios futuros (deltas). Como con el RegCM, los cambios son positivos y del orden de 1 a 2°C y con la Tmin con mayores cambios que la Tmax. Aunque los modelos tengan sesgo histórico, la consistencia en los cambios futuros de los ensambles con dos modelos diferentes (Figs. 23 y 24) reduce las incertidumbres.

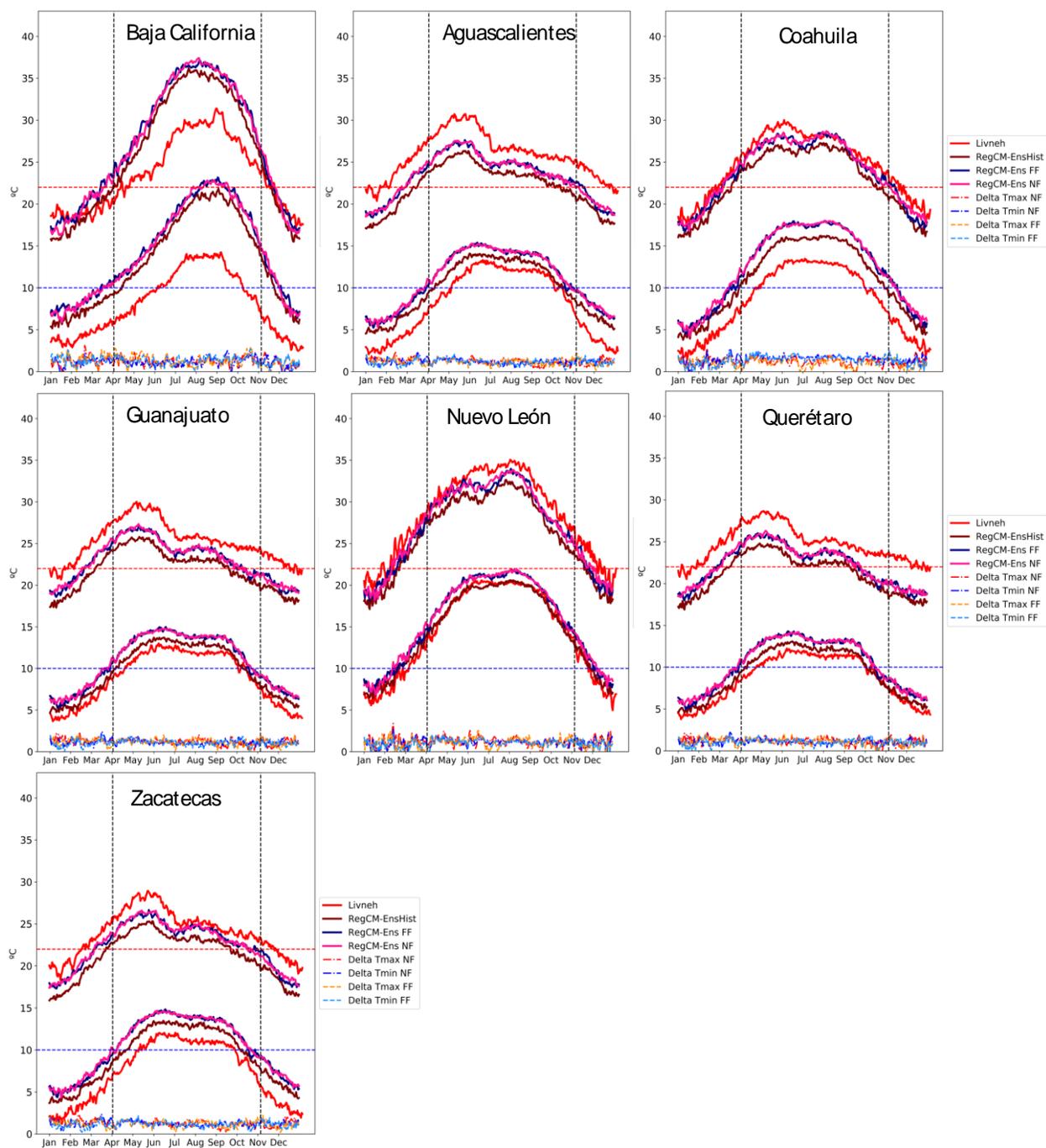


Figura 22. Climatologías diarias de Tmax y Tmin de las observaciones de Livneh y del ensamble del modelo regional RegCM para el periodo histórico (Hist: 1981-2010), futuro cercano (NF: 2021-2050) y futuro lejano (FF: 2070-2099), bajo el escenario RCP2.6 de bajas emisiones en las regiones vitivinícolas de siete estados de México. Las curvas cerca del cero son los cambios (delta) futuros de las variables. Las líneas quebradas verticales indican el periodo de crecimiento entre abril y octubre y las líneas horizontales son los umbrales de temperatura de 10 y 22°C.

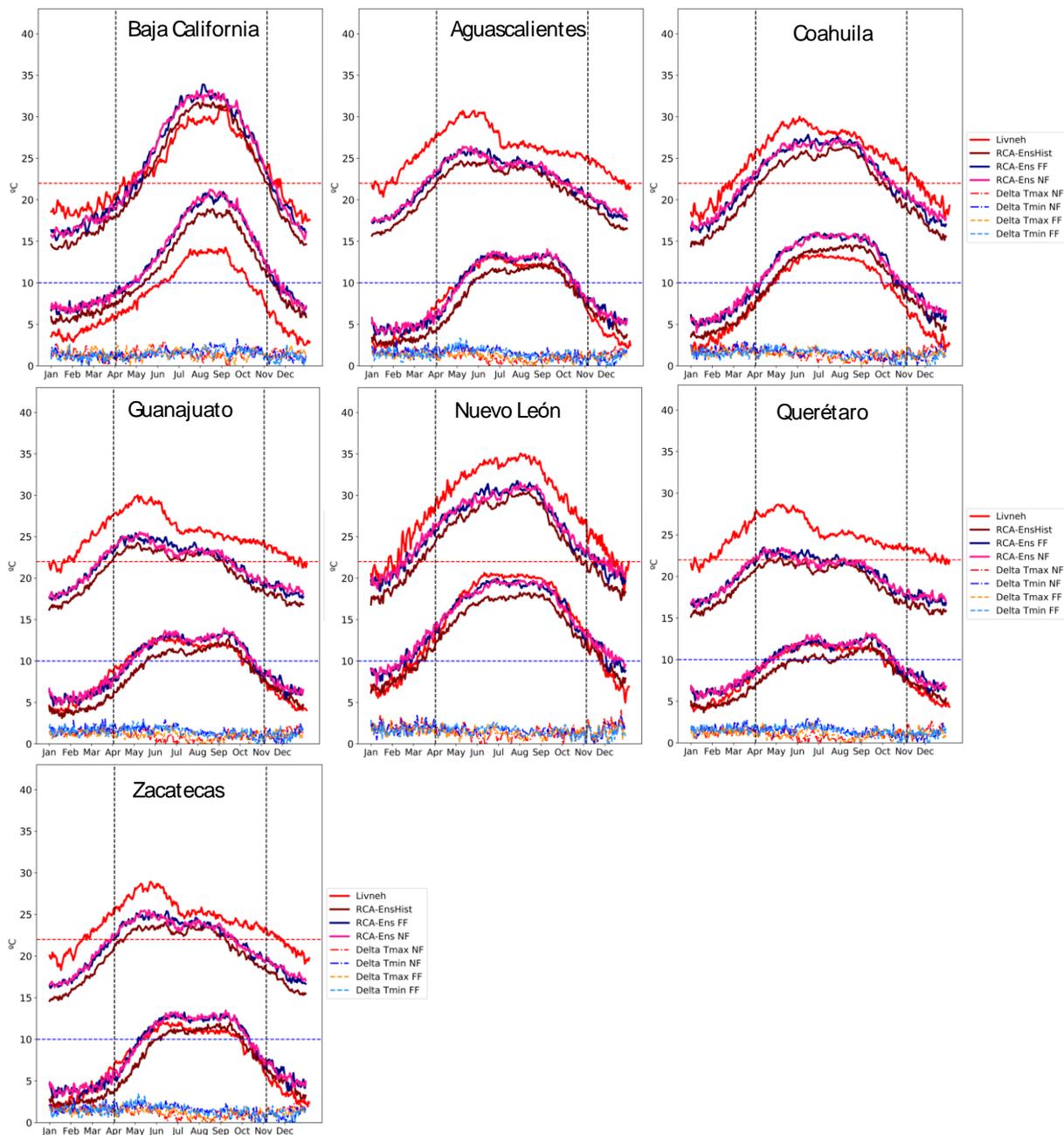


Figura 23. Igual que la Fig. 23, pero para los escenarios de bajas emisiones (RCP2.6) de los ensambles del modelo regional RCA.

Bajo el escenario de altas emisiones los cambios son más drásticos, como puede verse en las Fig. 25 (con RegCM) y Fig. 26 (con RCA). Las climatologías promedio se muestran para apreciar mejor el patrón general y los cambios en el ciclo diario de temperatura. Los deltas indican cambios entre 1 y 1.5°C en el futuro cercano (NF) en las dos variables y en casi todos los estados, mientras que en el futuro lejano (FF),

nuevamente la Tmin podría incrementarse más que la Tmax. Los incrementos podrían ser del orden de 3 a 4.5°C, afectando principalmente los primeros meses de la TC, de tal forma que el inicio podría adelantarse a febrero. Los cambios futuros (deltas) de las temperaturas diarias con el RCA bajo el escenario RCP8.5 (Fig. 26), son similares y del mismo orden que los obtenidos con RCA en la Fig. 25.

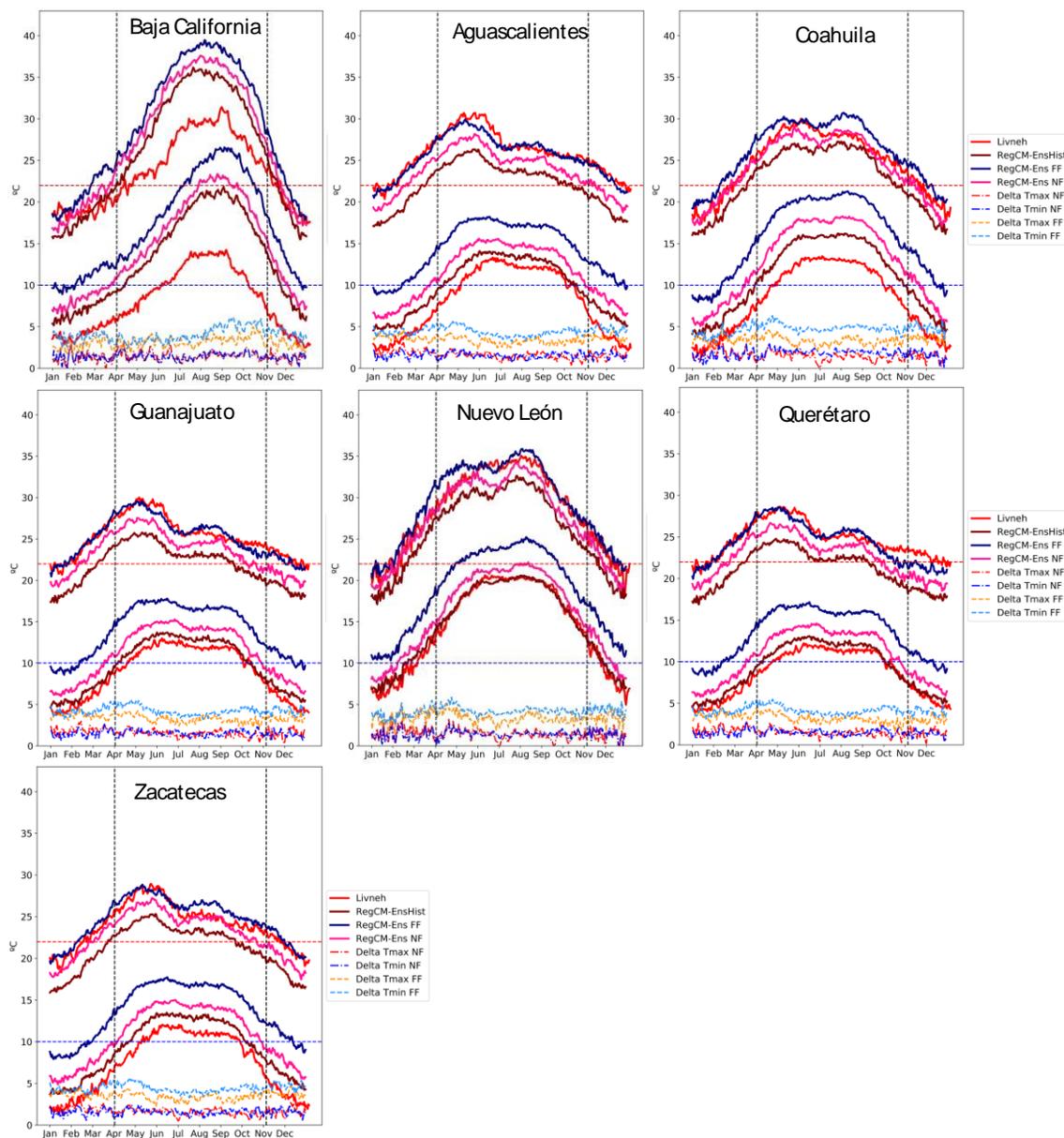


Figura 24. Como la Fig. 23, pero para el escenario RCP8.5 de altas emisiones del RegCM.

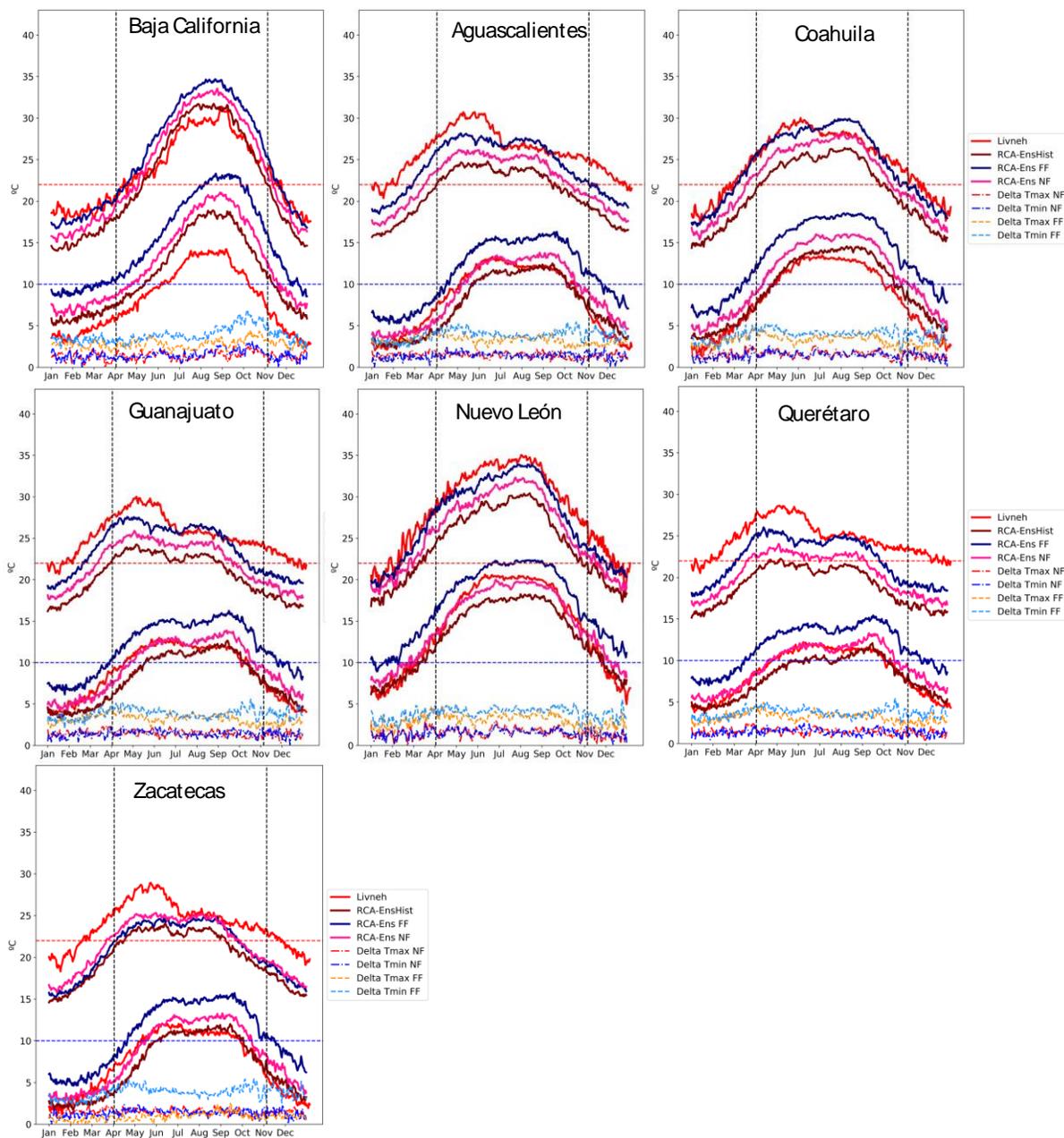


Figura 25. Como Fig. 24, pero para el escenario de altas emisiones del RCA.

4.2.2 Precipitación mensual futura

Los ciclos anuales de la precipitación mensual bajo el escenario de bajas emisiones durante el futuro cercano y el lejano muestran patrones similares al del periodo histórico en Baja California, como se puede ver en la Fig. 27 para el RegCM y la Fig. 28 para el modelo RCA. Los cambios futuros de la precipitación en Baja California son muy pequeños; podría haber un ligero aumento en la precipitación de verano,

especialmente en el futuro lejano y con el modelo RCA (Fig. 28). Esto también lo han sugerido algunos modelos globales (e.g., Cavazos y Arriaga-Ramirez, 2012). En los demás estados, el RegCM muestra cambios similares en el patrón mensual de las lluvias; el cambio más importante es que las lluvias en el pico de verano (julio-agosto) podrían disminuir entre 20 y 50 mm según el estado, pero podrían aumentar ligeramente entre septiembre y octubre. El RegCM muestra cambios similares en los dos periodos bajo el escenario de bajas emisiones (Fig. 27). Por el contrario, los escenarios de cambio con el modelo RCA (Fig.

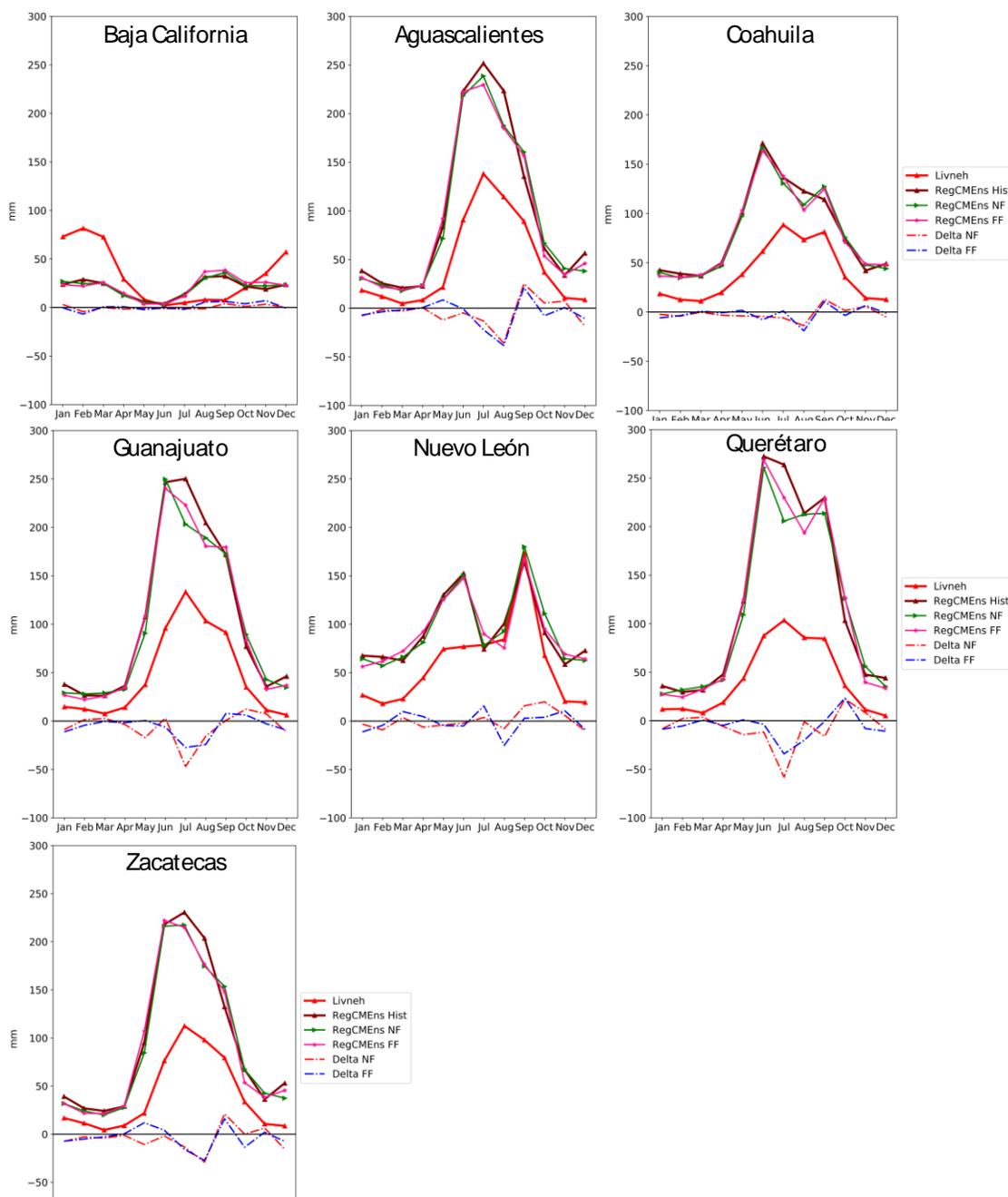


Figura 26. Precipitación mensual (ciclo anual) observado con Livneh y con el modelo RegCM para el periodo histórico (RegCMEns Hist), futuro cercano (RegCMEns NF) y futuro lejano (RegCMEns FF), bajo el escenario (RCP2.6) de bajas emisiones. Las líneas punteadas son los cambios futuros (deltas) de la precipitación para los dos periodos.

28) sugieren aumentos de precipitación entre 10 y 30 mm en todas las regiones vitivinícolas bajo el escenario de bajas emisiones, particularmente durante la temporada de crecimiento (abril-octubre). Esto significa que el escenario de bajas emisiones tiene más incertidumbre; si se promedian los dos modelos, los cambios futuros serían muy pequeños.

Los patrones del ciclo anual de precipitación para los escenarios futuros bajo las emisiones más altas (RCP8.5) sugieren cambios similares de acuerdo con RegCM y RCA, pero los cambios son mayores en el RegCM especialmente en el futuro lejano (Figs. 29 y 30). Según los dos modelos, la precipitación en Baja California podría incrementarse en el mes de septiembre en el futuro lejano (hasta ~60mm), mientras que en el cercano podría aumentar en octubre. Los cambios principales en las otras regiones del país es que en el verano la precipitación podría disminuir, principalmente en la temporada de la canícula en julio y agosto. Los dos modelos muestran una consistencia en los cambios, especialmente en el futuro lejano, aunque el RegCM sugiere reducciones mayores.

Los estados del altiplano central, Aguascalientes, Zacatecas y Guanajuato podrían tener un comportamiento similar de la precipitación en el futuro cercano y lejano. En el futuro cercano podría haber una disminución de hasta 30 mm, mientras que en el lejano podría ser de hasta ~80 mm, como es el caso de Aguascalientes. Querétaro por su parte podría tener un comportamiento diferente pues podría presentar una ligera canícula entre junio y septiembre alcanzando valores de ~270mm, además de que la precipitación podría disminuir a partir de los meses de julio poco más de 50mm.

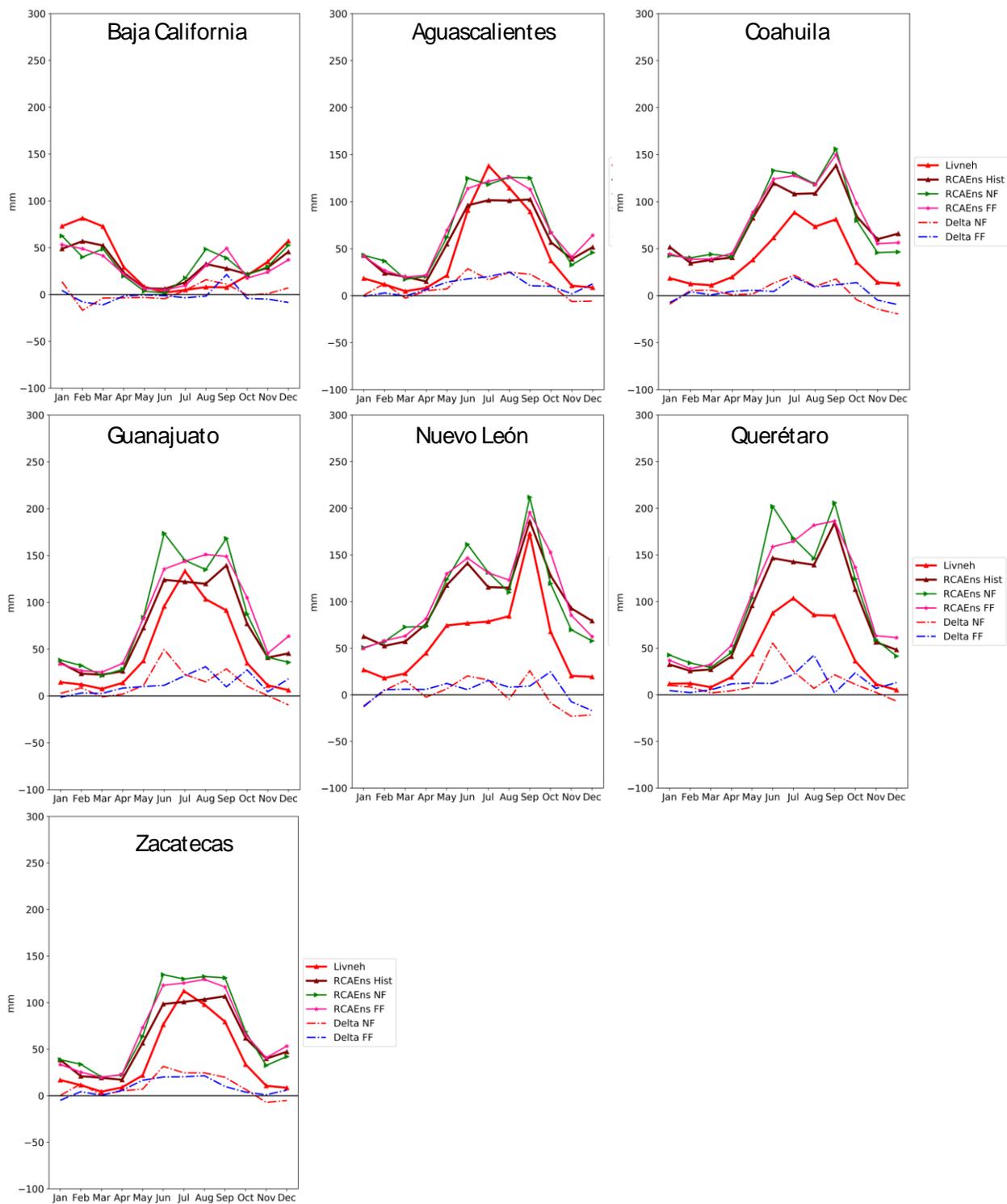


Figura 27. Como Fig. 27, pero para el modelo RCA.

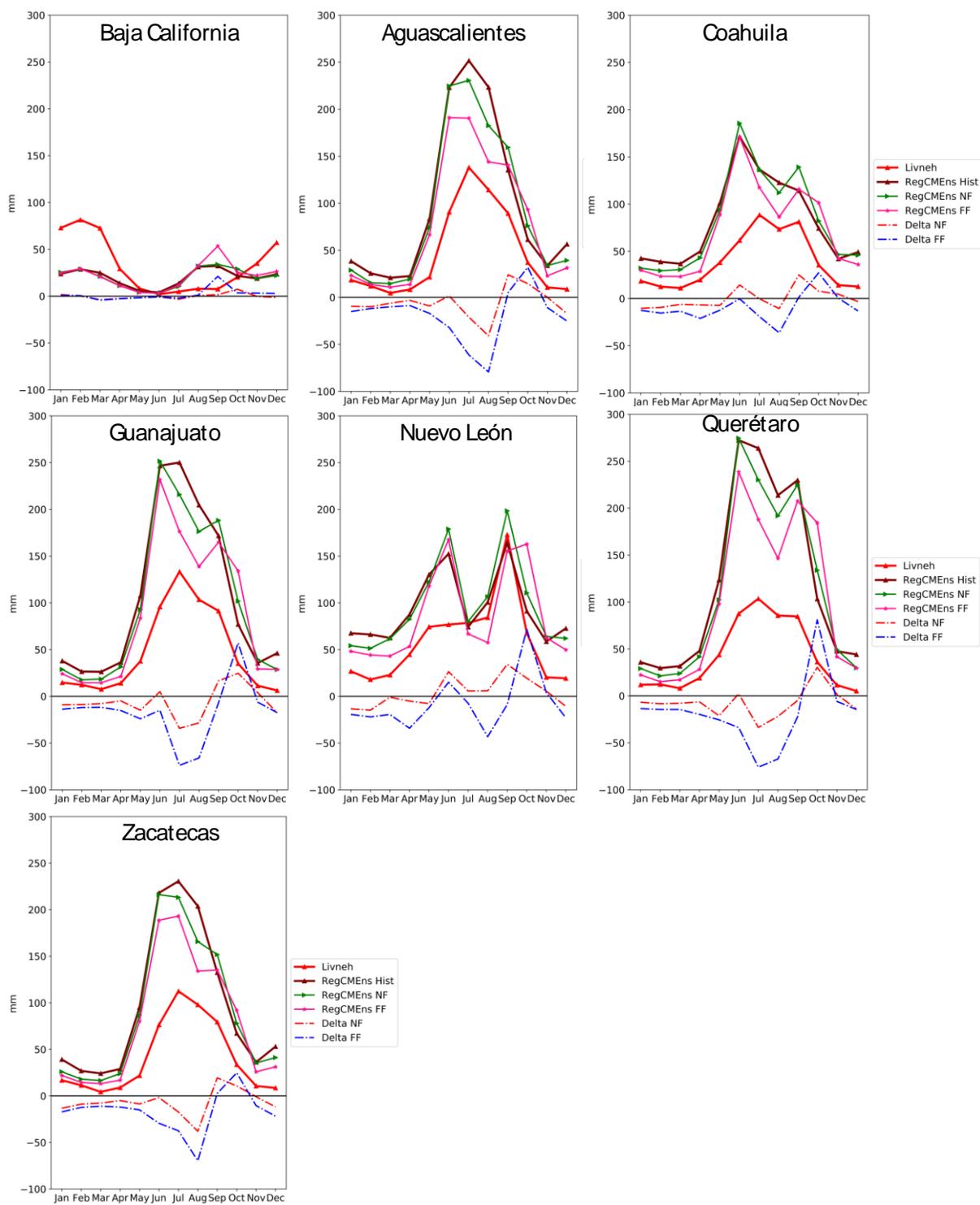


Figura 28. Como la Fig. 27, pero bajo el escenario de altas emisiones.

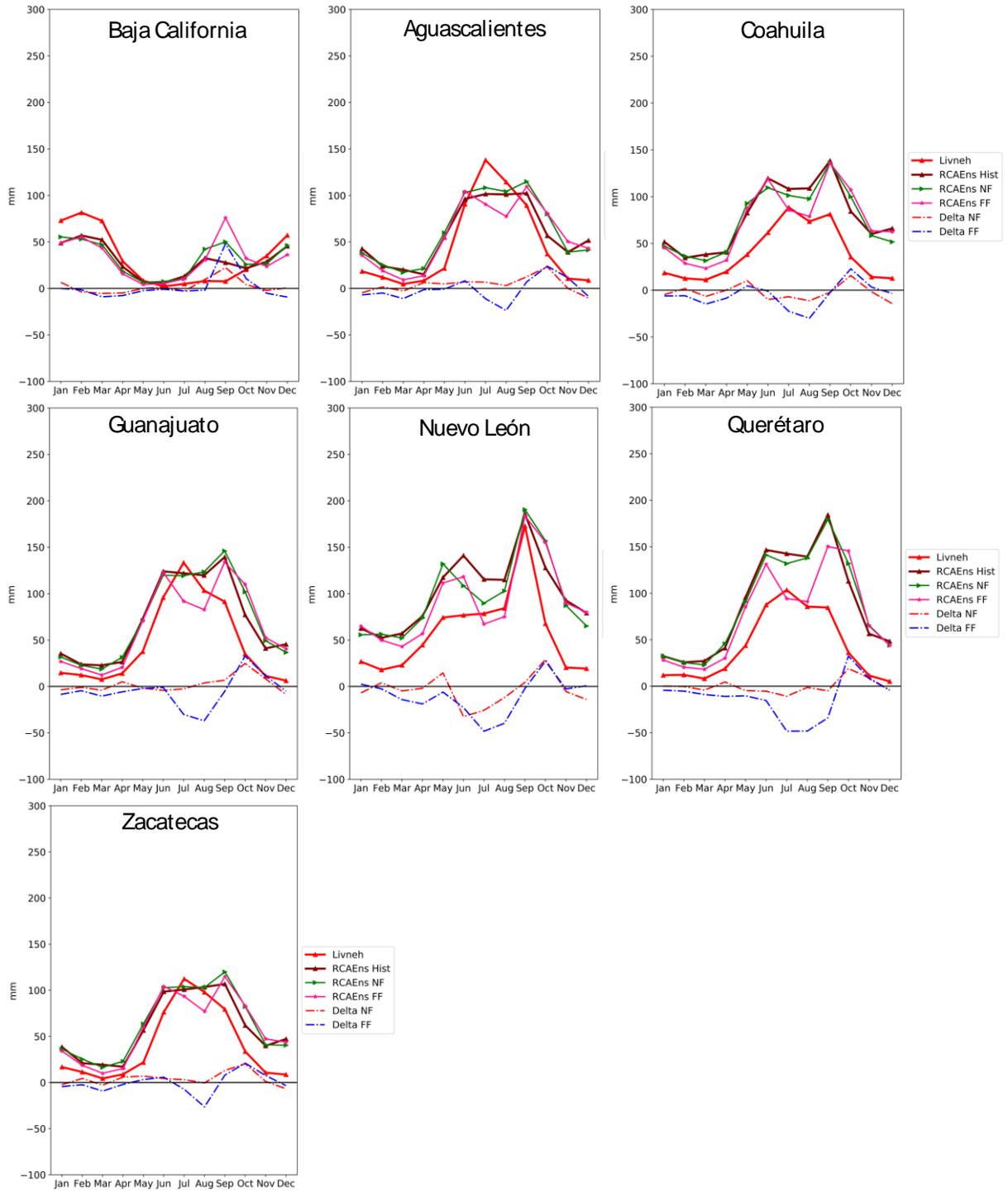


Figura 29. Como Fig. 29, pero para el modelo RCA.

4.2.3 Unidades Calor (UC) futuras

En la Figura 31 se muestran los mapas de las UCs de acuerdo con el modelo RegCM bajo los escenarios de bajas y altas emisiones para el futuro cercano y el lejano. Cada renglón de mapas representa las UCs del RegCM forzado con diferentes modelos globales y los dos escenarios. El umbral de aptitud (isolínea de 2700 °D) rodea a todo el altiplano desde el norte al sur de México y la zona montañosa del suroeste de Estados Unidos. Los cambios más grandes se ven en la última columna (escenario RCP8.5 en el futuro lejano), cuando el área de las UC aptas para la vitivinicultura en el altiplano y en California podría reducirse casi a la mitad. Estos escenarios se aprecian mejor en las Fig. 32 y Fig. 33 donde se muestran los cambios futuros ante bajas y altas emisiones con respecto al periodo histórico del RegCM.

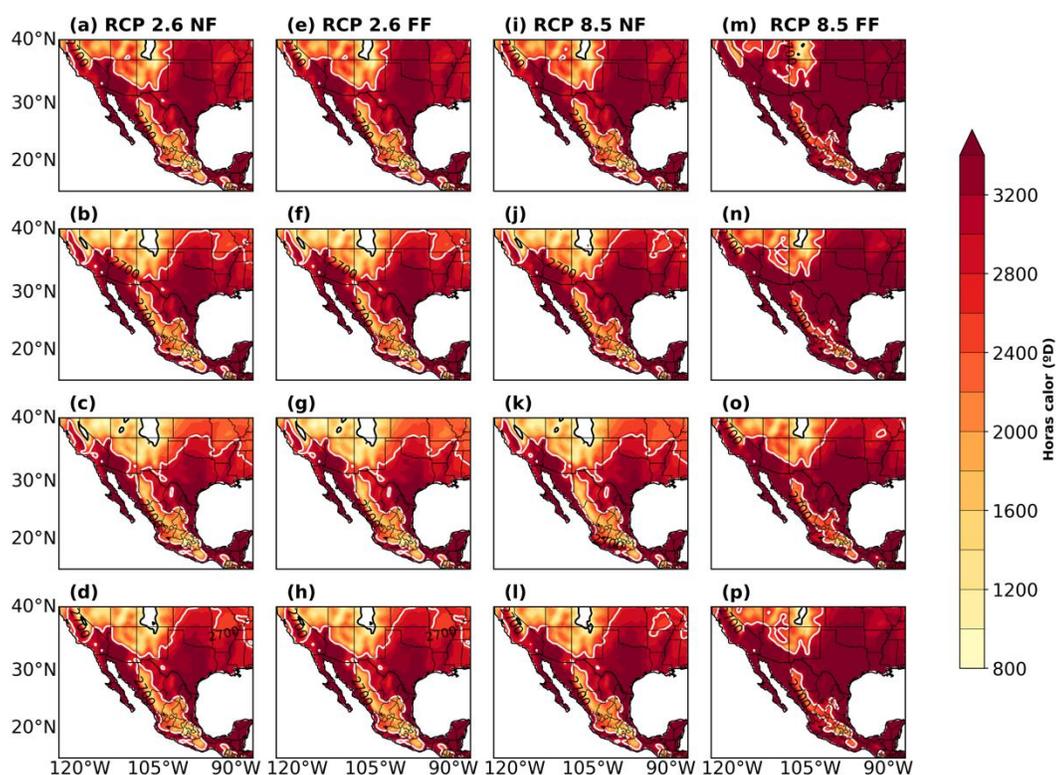


Figura 30. Unidades calor bajo el escenario de bajas emisiones en el futuro cercano (2021-2050) en la primera columna izquierda (a) y lejano en la segunda columna (e); y bajo el escenario de altas emisiones en el futuro cercano en la tercera columna (i) y en el futuro lejano en la columna derecha (m). En a), e) i) y m) RegCM-Had. En b), f), j) y n) RegCM-MPI. En c), g), k) y o) RegCM-GFDL. En d), h), l) y p) RegCM-Ens.

La Fig. 32 muestra que los escenarios de bajas emisiones de las UC de los modelos globales y el ensamble promedio podrían aumentar entre 100 a 400°D, siendo todas significativas. Sin embargo, en el

futuro lejano podría haber una disminución significativa de las UC entre -50 a -100°D , como lo muestra la última columna de la Fig. 32

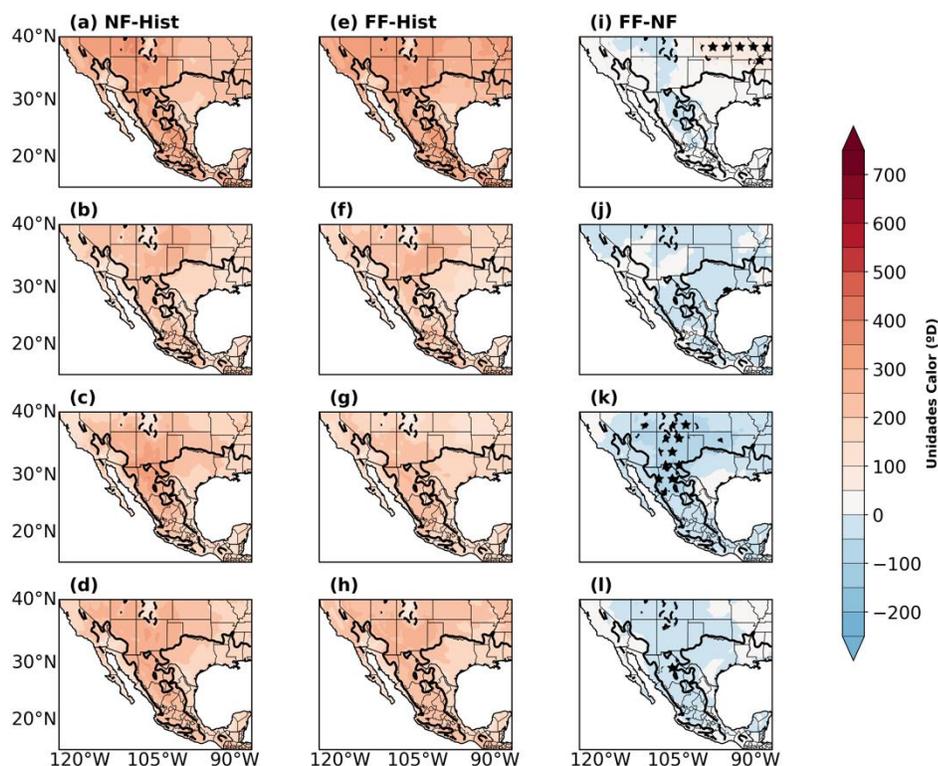


Figura 31. Cambio (delta) de unidades calor con el escenario de bajas emisiones entre el futuro cercano y el periodo histórico en la primera columna, entre el futuro lejano y el histórico en la segunda columna y entre el futuro lejano y cercano en la tercera columna. Primera línea: (a), (e) y (i) simulaciones de RegCM-Had. Segunda línea: (b), (f) y (j) RegCM-MPI. Tercera línea: (c), (g) y (k) RegCM-GFDL. Última línea: (d), (h) y (l) RegCM-Ens. La isolinia negra continua es la de 2700°D en el periodo histórico de Livneh y la punteada es la de 850°D . Las estrellas en la última columna son los cambios significativos; en la primera y segunda columnas todo el dominio tiene cambios significativos, pero las estrellas no se muestran.

Los cambios bajo el escenario de altas emisiones son más drásticos, especialmente en el altiplano y en el futuro lejano. En la primera columna de la Fig. 33 se ve un aumento significativo de UCs entre 100 a 450°D . Para el futuro lejano el aumento de UCs es mayor de 700°D en el altiplano central, las Californias, el altiplano norte y parte del Noreste de México. Entre el futuro lejano y el cercano hay también un aumento significativo de $\sim 600^{\circ}\text{D}$ en todo el altiplano central, Coahuila y al suroeste de Nuevo León; en las Californias el aumento es de ~ 450 a 500°D .

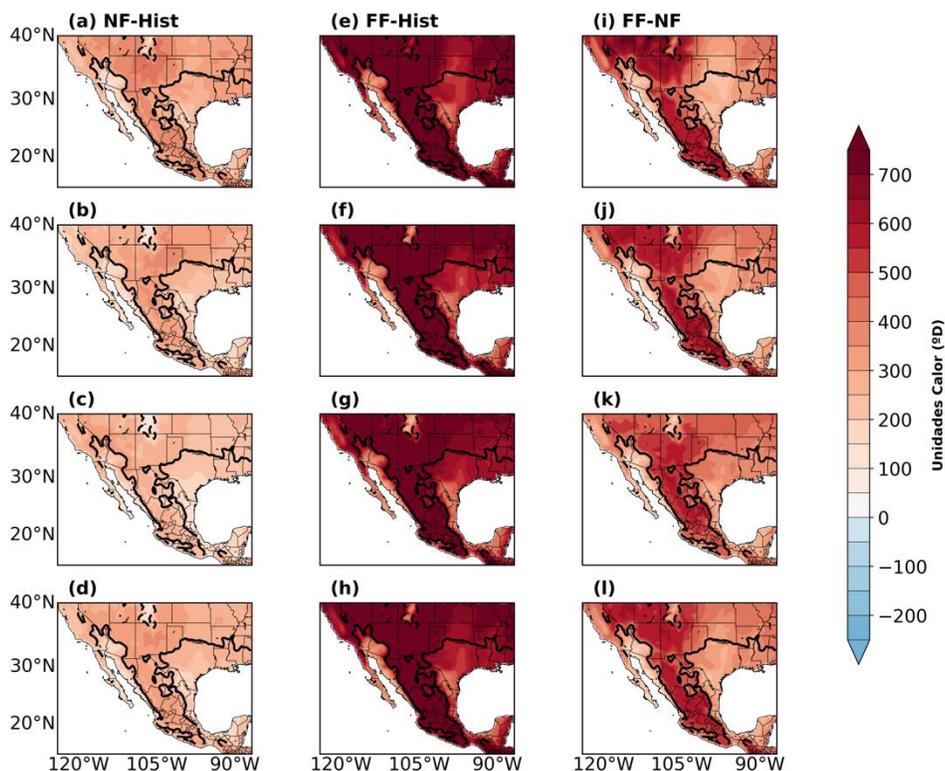


Figura 32. Cambio (delta) de unidades calor con el escenario de altas emisiones entre el futuro cercano y el periodo histórico en la primera columna, entre el futuro lejano y el histórico en la segunda columna y entre el futuro lejano y cercano en la tercera columna. Primera línea: (a), (e) y (i) simulaciones de RegCM-Had. Segunda línea: (b), (f) y (j) RegCM-MPI. Tercera línea: (c), (g) y (k) RegCM-GFDL. Última línea: (d), (h) y (l) RegCM-Ens. La isolínea negra continua es la de 2700°D en el periodo histórico de Livneh y la punteada es la de 850°D. Todos los cambios son significativos en este escenario

Como en el periodo histórico el RegCM no simuló adecuadamente las UC de las Californias por ser más caliente de lo observado, se hizo una corrección por sesgo. En la Fig. 34 se puede ver que con dicha corrección la zona de las Californias, el altiplano central, parte del Noreste y una pequeña zona de Coahuila siguen siendo aptas para la vid pues las isolíneas de 2700 encierran a estas zonas; esto mismo se repite hacia finales del siglo. Los cambios más grandes se muestran bajo el escenario de altas emisiones en el futuro lejano (RCP8.5FF) en la Fig. 34; la isolínea de 2700 °D que rodea al altiplano central se contrae significativamente a finales de siglo, por lo que las regiones vitivinícolas del altiplano podrían tener un alto riesgo de perderse bajo este escenario si no se llevan a cabo medidas drásticas de adaptación. Bajo este escenario y de acuerdo con las UC, las Californias podrían seguir siendo aptas para la vitivinicultura.

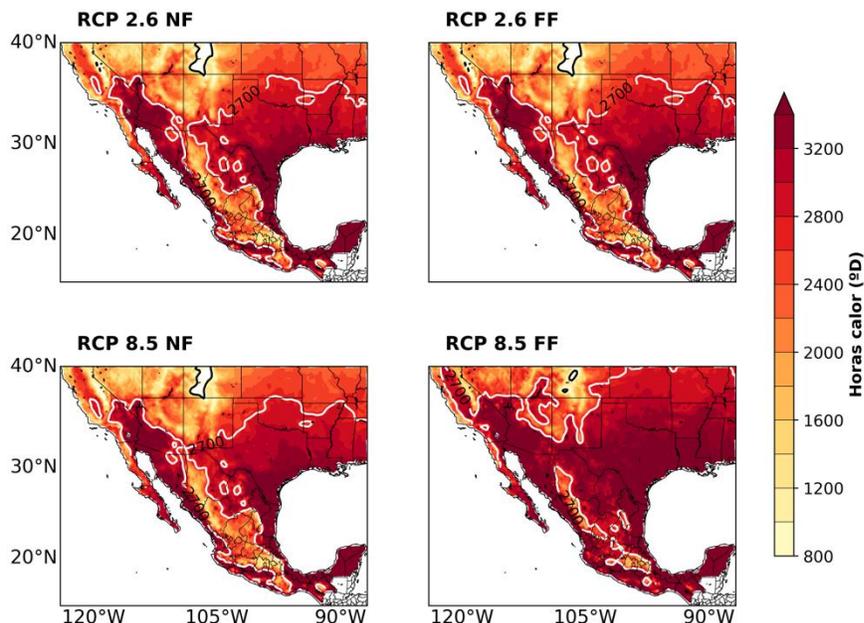


Figura 33. Escenarios futuros de las unidades calor con la corrección por sesgo de RegCM del ensamble de los modelos globales: RCP2.6 NF es el periodo 2021-2050; RCP2.6 FF 2070-2099; RCP8.5 NF (2021-2050) y RCP8.5 FF (2070-2099).

RCA tiene un comportamiento distinto, pues como se ve en la Fig. 35 en las simulaciones de todos los modelos globales y el ensamble, en el futuro cercano y lejano en el escenario de bajas emisiones la región de las Californias, el altiplano central, el Noreste y el altiplano norte siguen siendo zonas aptas para la viticultura. En el escenario de bajas emisiones no hubo simulaciones de RCA con el modelo GFDL, por lo que el ensamble se realizó con RCA-HadGEM y RCA-MPI.

Bajo el escenario de altas emisiones en el futuro cercano tanto RCA-Had (Fig. 35i), el RCA-MPI (Fig. 35j) y el RCA-Ens (Fig. 35l) tienen un comportamiento similar, pues toda la zona del altiplano central, las Californias, el Noreste y altiplano norte son aptas para la viticultura; por su lado el RCA-GFDL (Fig. 35k) muestra valores menores a 800^oD en la zona montañosa de California, EUA. En el futuro lejano es donde se ven los mayores cambios, pues como puede verse en la Fig. 35m, n, o y p las isolíneas del altiplano de 2700^oD se contrajeron, además de que la isolínea de 850^oD de la simulación con RCA-Had (Fig. 35m) es muy pequeña.

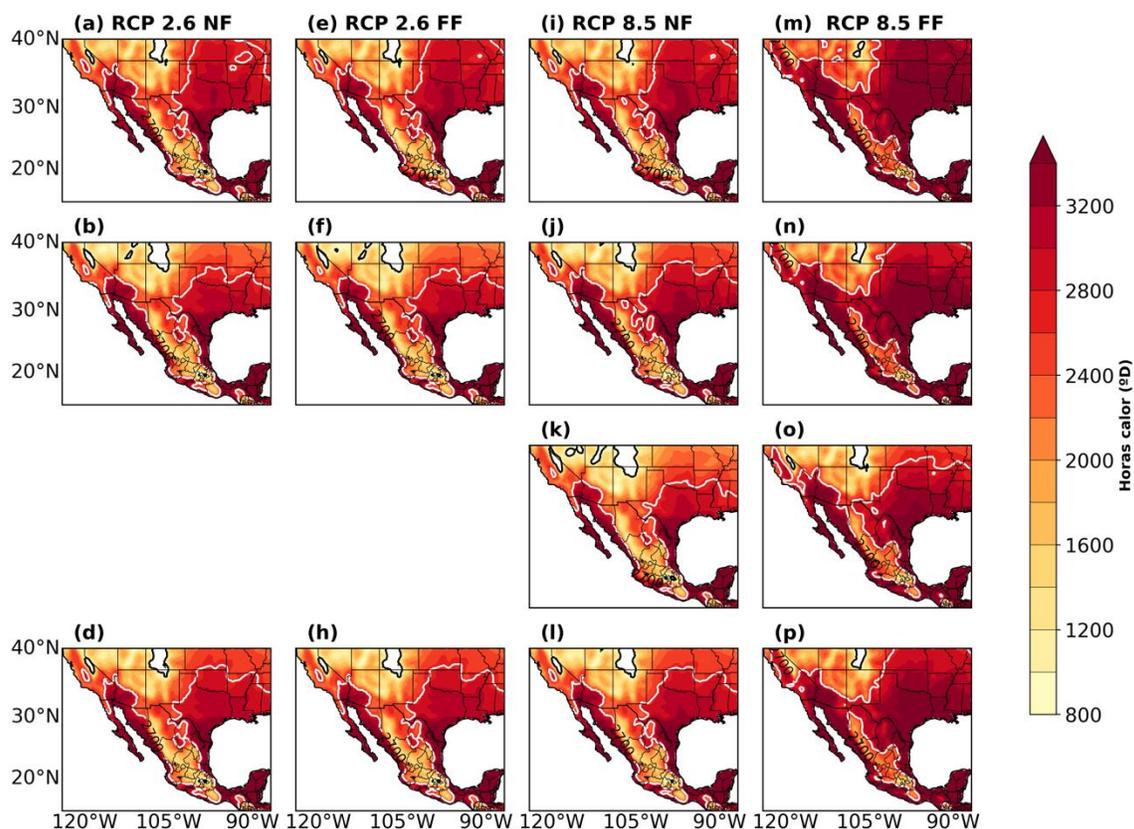


Figura 34. Unidades calor bajo el escenario de bajas emisiones en el futuro cercano (2021-2050) en la primera columna izquierda (a) y lejano en la segunda columna (e); y bajo el escenario de altas emisiones en el futuro cercano en la tercera columna (i) y en el futuro lejano en la columna derecha (m). En a), e) i) y m) RCA-Had. En b), f), j) y n) RCA-MPI. En c), g), k) y o) RCA-GFDL. En d), h), l) y p) RCA-Ens.

Los cambios como se puede ver en la Fig. 36 son de entre 100 a 350 °D en el futuro cercano con el escenario de bajas emisiones en todos los modelos y el ensamble, además de que estos son significativos. Para finales del siglo XXI los cambios son similares, aunque con el modelo MPI hay un cambio menor como puede verse en la Fig. 36f. Entre el futuro cercano y lejano hay un ligero enfriamiento en la zona centro sur de EUA con Had (Fig. 36i), siendo significativa solo la zona del este de EUA. Con el RCA-MPI este enfriamiento se da en casi todo México, siendo de ~ -100 a -150 °D, mientras que con el ensamble este enfriamiento se ve solo en el norte de México y centro sur y suroeste de EUA (Fig. 36k).

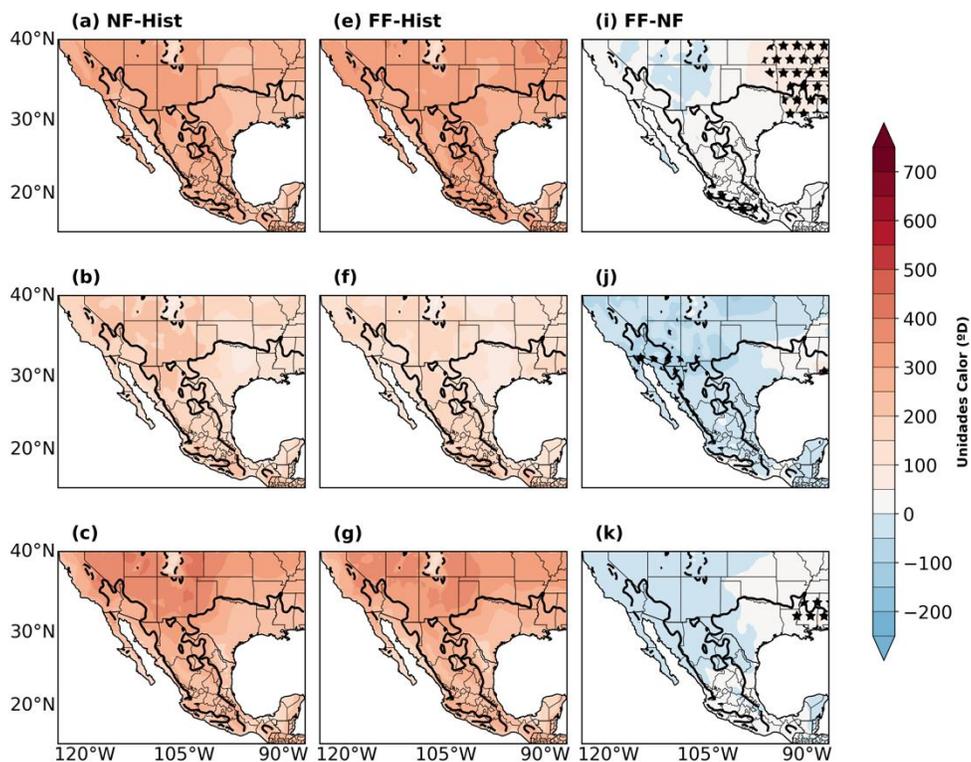


Figura 35. Delta de unidades calor con el escenario de bajas emisiones entre el futuro cercano y el periodo histórico en la primera columna izquierda, entre el futuro lejano y el histórico en la segunda columna y entre el futuro lejano y cercano en la tercera columna a la derecha. En a), e) y i) son las simulaciones de RCA-Had; en b), f) y j) RCA-MPI; en c), g) y k) RCA-Ens. La isólnea negra continua es la de 2700°D en el periodo histórico de Livneh y la punteada es la de 850°D. Las estrellas negras indican cambios significativos entre el futuro cercano y lejano, en los otros periodos todos los cambios son significativos.

Entre el futuro cercano y el histórico se pueden ver cambios de entre 450 a 200°D en casi todas las simulaciones de RCA y ensamble, y los cambios son significativos (Fig. 37). Los cambios entre finales del siglo XXI y el periodo histórico son mayores, alcanzando hasta los 700°D en casi toda la región de estudio y con todas las simulaciones de los modelos, principalmente en el altiplano central y en la región de las Californias. Entre el futuro lejano y cercano los cambios más notorios se dan en la región del altiplano, alcanzando los 600°D y en la región del sur de EUA y también parte de las Californias con RCA-Had (Fig. 37i). Con las otras simulaciones el mayor calentamiento se da en la región del altiplano y los cambios podrían ser de hasta 600°D o de 550 como puede verse con RCA-GFDL (Fig. 37k). Todos los cambios son significativos en toda la región de estudio.

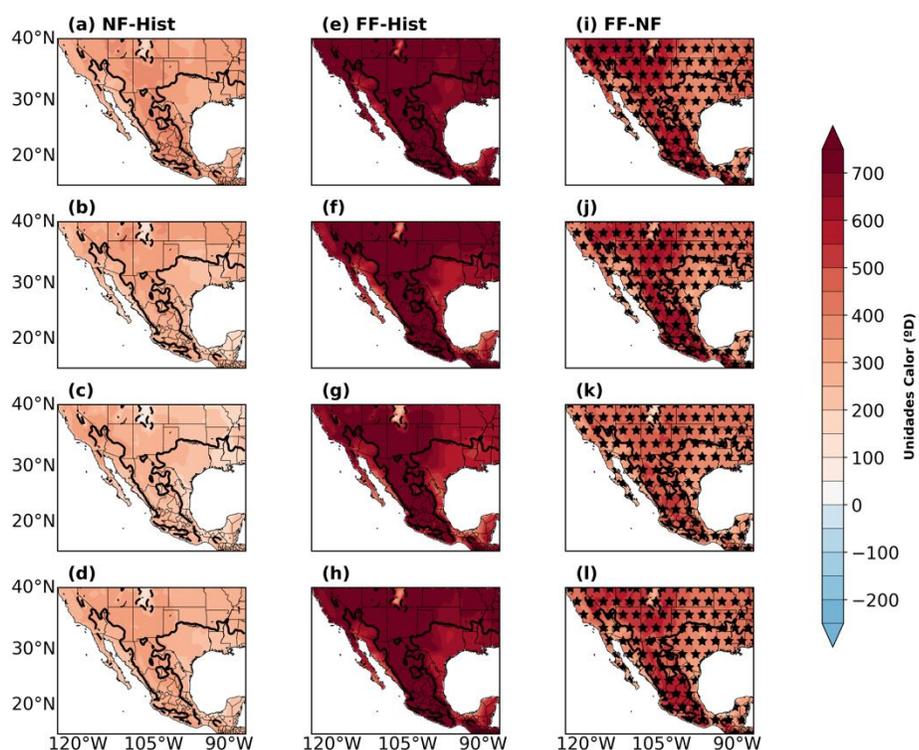


Figura 36. Delta de unidades calor con el escenario de altas emisiones entre el futuro cercano y el periodo histórico en la primera columna izquierda, entre el futuro lejano y el histórico en la segunda columna y entre el futuro lejano y cercano en la tercera columna a la derecha. En a), e) y i) son las simulaciones de RCA-Had; en b), f) y j) RCA-MPI; en c), g) y k) RCA-GFDL y en d), h) y l) RCA-Ens. La isolínea negra continua es la de 2700°D en el periodo histórico de Livneh y la punteada es la de 850°D.

4.2.4 Precipitación de la temporada de crecimiento (GSP)

En la Fig. 38 se muestran los cambios del GSP los cuales son mayores en la simulación realizada con Reg-Had (Fig. 38a, b, c y d). En el futuro cercano los cambios que podrán esperarse con el ensamble son de hasta -250 mm en el altiplano central, mientras que hacia el noroeste del país y en California EUA podrían esperarse cambios de hasta 25 mm. La simulación con Reg-GFDL (Fig. 38i) presenta un dipolo, lo que sugiere que en el norte podría haber cambios negativos (de hasta -150 mm) y hacia el sureste y centro podrían ser positivos (de hasta 150 mm). En el futuro lejano los cambios podrían ser similares a los del cercano, sólo que la simulación con Reg-MPI (Fig. 38f) podría tener un cambio más marcado tanto hacia el norte y sur de México. Bajo el escenario de altas emisiones y futuro cercano la simulación de Reg-Had (Fig. 38c) y Reg-MPI (Fig. 38g) muestran un patrón ligeramente más húmedo en Nuevo León; el Reg-GFDL también muestra un patrón húmedo en la costa del Golfo de México (Fig. 38k).

Hacia finales del siglo XXI las simulaciones de RegCM que muestran mayores cambios son las del MPI, GFDL y Ens (Fig. 38h, l y p). Con Reg-MPI (Fig.38h) se podrían esperar mayores cambios negativos en el altiplano central, mientras que en las Californias y Coahuila podría haber un patrón húmedo. Con Reg-GFDL el patrón negativo podría ser más marcado hacia el noroeste, y a diferencia del futuro cercano, en Nuevo León y Coahuila podría haber una reducción de precipitación; sólo en Veracruz y en la costa del Pacífico sur podrían esperarse cambios húmedos.

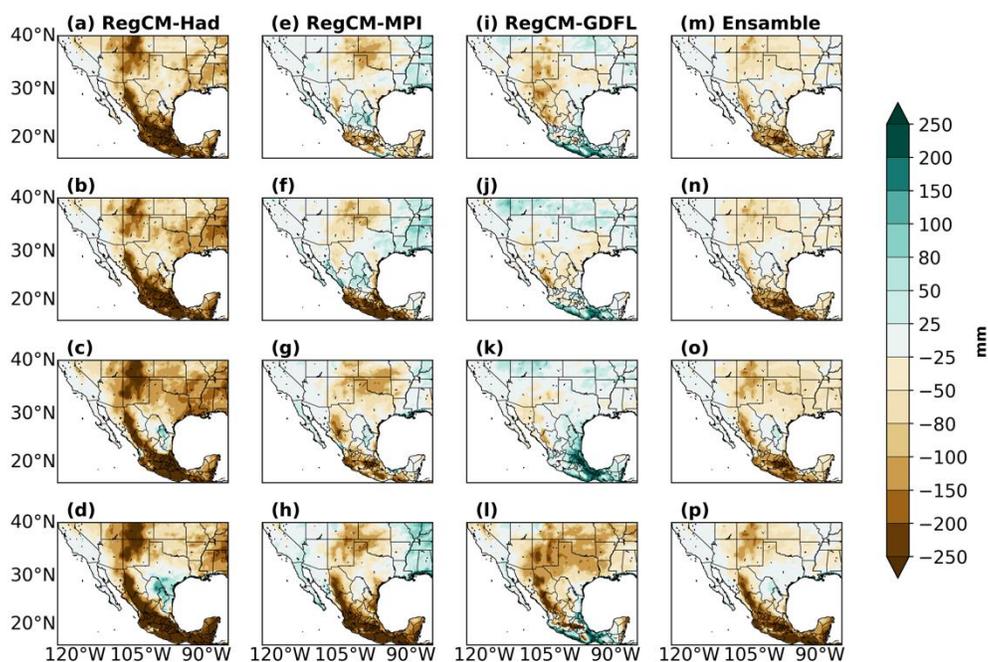


Figura 37. Delta de precipitación de (TC) con el escenario de bajas emisiones entre el futuro cercano y el periodo histórico en la primera fila, y entre el futuro lejano y el histórico en la segunda fila. Delta con el escenario de altas emisiones entre el futuro cercano y el histórico en la tercera fila; entre el futuro lejano y el histórico en la cuarta fila. En a), b), c) y d) son las simulaciones de RegCM-Had. En e), f), g) y h) RegCM-MPI. En i), j), k) y l) RegCM-GFDL. En m), n), o), y p) RegCM-Ens.

Los cambios con respecto al periodo histórico son menos drásticos con RCA; con el escenario de bajas emisiones en el futuro cercano hay un dipolo en la simulación con RCA-Had (Fig. 39a), que sugiere un patrón seco en el golfo de México y uno húmedo en el Pacífico, incluyendo algunos estados del altiplano central. La simulación con RCA-MPI (Fig. 39e) muestra lo contrario pues en el noroeste de México se ve que podría haber un patrón seco y en el golfo, así como en el altiplano central uno ligeramente húmedo. Para finales del siglo XXI, bajo este mismo escenario, el comportamiento de los dos modelos y el ensamble

es similar al del futuro cercano, solo que el MPI (Fig. 39f) muestra una posible disminución de precipitación en Tamaulipas.

Con el escenario de altas emisiones en el futuro cercano, RCA-Had muestra un patrón similar al escenario de bajas emisiones (Fig. 39c), mientras que con el RCA-MPI el comportamiento que podría tener el GSP es el contrario al de bajas emisiones, pues como se ve en la Fig. 39g, en BC y en la costa del Pacífico, como en Jalisco, podría haber un aumento de precipitación. El RCA-GFDL (Fig. 39i) muestra este mismo patrón, aunque en el noreste el GSP podría ser neutral y en Coahuila podría ser húmedo. El ensamble (Fig. 39m) muestra un posible patrón húmedo en las Californias y uno neutral a húmedo en el altiplano central, mientras que al sur de Nuevo León podría ocurrir una disminución del GSP, así como en el norte de Coahuila. A finales del siglo XXI se esperan mayores cambios con el escenario de altas emisiones, como lo muestran las simulaciones con RCA-Had, RCA-MPI y el RCA-Ens (Fig. 39d, h y n) podría haber una disminución del GSP en Nuevo León y en el noroeste de Coahuila. En todo el Golfo de México, así como en la costa sur del Pacífico podría haber una disminución de este índice de hasta 250 mm. El ensamble muestra un patrón ligeramente húmedo en las Californias y en la costa del Pacífico.

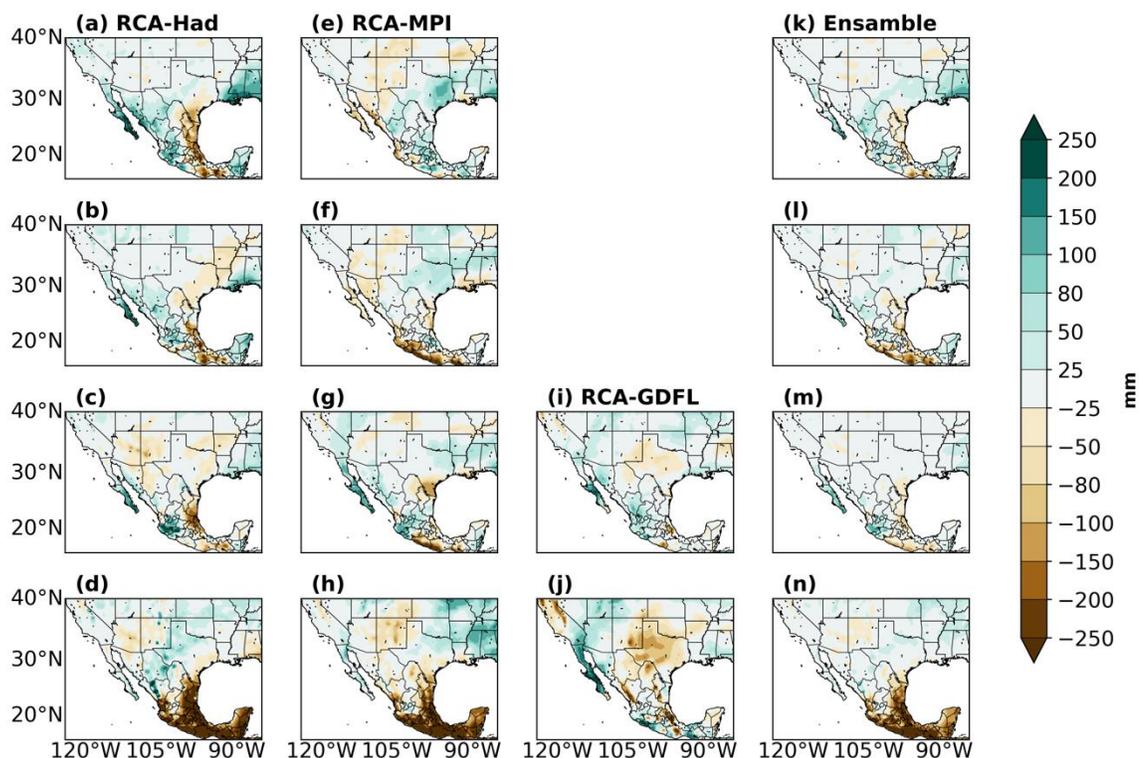


Figura 38. Delta de precipitación de (TC) con el escenario de bajas emisiones entre el futuro cercano y el periodo histórico en la primera fila, y entre el futuro lejano y el histórico en la segunda fila. Delta con el escenario de altas emisiones entre el futuro cercano y el histórico en la tercera fila; entre el futuro lejano y el histórico en la cuarta fila. En a), b), c) y d) son las simulaciones de RegCM-Had; en e), f), g) y h) RegCM-MPI; en i) y j) RegCM-GFDL y en k), l), m) y n) RegCM-Ens.

4.2.5 Índice de noches frías (CI)

En la Fig. 40 se muestran los cambios del CI con el escenario de bajas emisiones entre el futuro cercano y el periodo histórico, los cuales son entre 2 a 1°C. En la simulación con Reg-Had (Fig. 40a) se puede ver que casi todo el país podría tener un calentamiento de ~2°C y en California, EUA, podría ser de 3°C. El Reg-MPI (Fig. 40e) muestra un posible calentamiento hacia el norte del país de 2°C, mientras que para el centro y sur podría ser de 1°C. El Reg-Ens muestra un posible calentamiento de 1°C en todo el país y en California de 2°C. Para el futuro lejano con este mismo escenario podría haber aumentos de temperatura del mismo rango que en el futuro cercano. La simulación más caliente, nuevamente es la de Reg-Had (Fig. 40b). La simulación del Reg-MPI (Fig. 40f) muestra un “enfriamiento”, con posibles aumentos de temperatura de 1°C y 2°C al norte de Coahuila y en Baja California. Los cambios entre el escenario de bajas emisiones, futuro cercano y el periodo histórico son entre 2 a 1°C; en la simulación con Reg-Had (Fig. 40a) se puede ver que casi todo el país podría tener un calentamiento de ~2°C y en California, EUA, podría ser de 3°C. El Reg-MPI (Fig. 40e) también muestra un posible calentamiento en el norte del país de 2°C, mientras que para el centro y sur podría ser de 1°C. El ensamble muestra un posible calentamiento de 1°C en todo el país y en California de 2°C. En el futuro lejano podría haber aumentos de temperatura del mismo rango que en el futuro cercano. La simulación más caliente nuevamente es la de Reg-Had (Fig. 40b).

Bajo el escenario de altas emisiones en el futuro cercano el posible aumento de temperatura podría ser de 2°C en casi todo el país, a excepción de la simulación con Reg-Had (Fig. 40c), la cual muestra un posible aumento de 3°C en los estados del altiplano central. La simulación del Reg-MPI (Fig. 40g) y Reg-GFDL (Fig. 40k) muestran un posible aumento de 3°C en Chihuahua y Baja California. Hacia finales del siglo XXI, el aumento de la T_{min} para el mes de septiembre podría llegar a ser de hasta 6°C para la región de las Californias y algunas partes del altiplano central, como Zacatecas, de acuerdo con las simulaciones de Reg-Had y Reg-MPI (Fig. 40d y h). El resto del país podría tener un aumento de hasta 4 y 5°C. El ensamble muestra un posible aumento máximo de 5°C

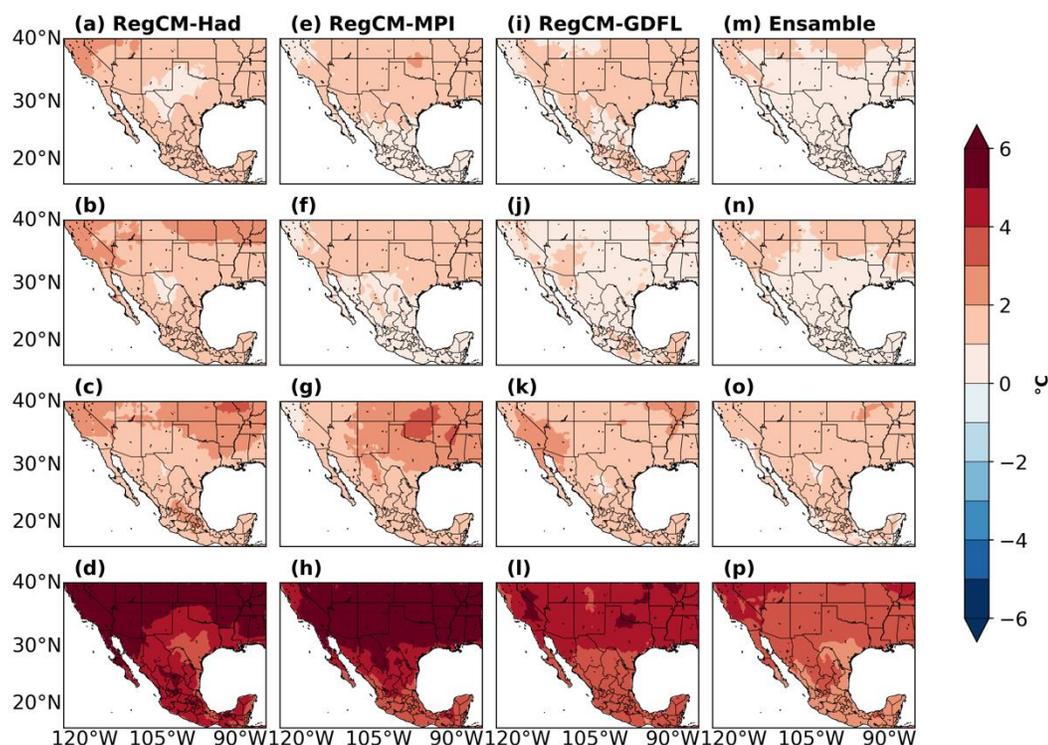


Figura 39. Delta de índice de noches frías de septiembre (CI) con el escenario de bajas emisiones entre el futuro cercano y el periodo histórico en la primera fila, y entre el futuro lejano y el histórico en la segunda fila. Delta con el escenario de altas emisiones entre el futuro cercano y el histórico en la tercera fila; entre el futuro lejano y el histórico en la cuarta fila. En a), b), c) y d) son las simulaciones de RegCM-Had; en e), f), g) y h) RegCM-MPI; en i) y j) RegCM-GFDL y en k), l), m) y n) RegCM-Ens.

Los cambios del CI del modelo RCA con respecto al periodo histórico se muestran en la Fig. 41. Con el escenario de bajas emisiones y en el futuro cercano, en casi todo el país la T_{min} de septiembre podría aumentar hasta 2°C y sólo en algunas zonas como en Baja California y al norte de Nuevo León el aumento podría llegar a ser de 3°C con la simulación de RegCM-Had (Fig. 41a). Con RegCM-MPI (Fig. 41e) se ve un aumento mayor hacia el noroeste y el sur, mientras que el ensamble muestra un aumento en casi todo México de 2°C . Hacia finales del siglo, con este mismo escenario, podría haber un calentamiento similar al del futuro cercano.

Con el escenario de altas emisiones en el futuro cercano, podría haber un aumento de la T_{min} de hasta 3°C (Fig. 41c). Para el futuro lejano, con este mismo escenario, el calentamiento podría llegar a ser de 6°C en la región norte de la zona de estudio. En RegCM-Ens (Fig. 41n) se puede ver que el mayor calentamiento se podría dar en California, EUA ($\sim 6^{\circ}\text{C}$) mientras que en México el mayor aumento podría llegar a ser de

4°C, dándose en la región del norte, noroeste y sureste; el altiplano central podría llegar a tener un aumento de 3°C.

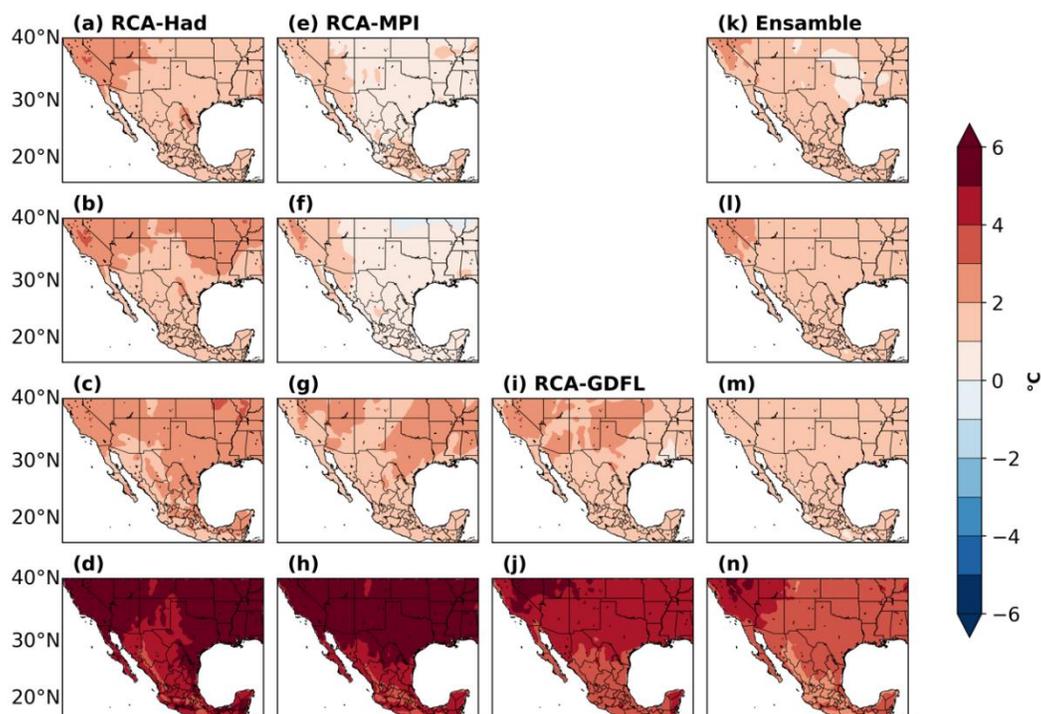


Figura 40. Delta de índice de noches frías de septiembre (CI) con el escenario de bajas emisiones entre el futuro cercano y el periodo histórico en la primera fila, y entre el futuro lejano y el histórico en la segunda fila. Con el escenario de altas emisiones en entre el futuro cercano y el histórico en la tercera fila; entre el futuro lejano y el histórico en la cuarta fila. En a), b), c) y d) son las simulaciones de RegCM-Had; en e), f), g) y h) RegCM-MPI; en i) y j) RegCM-GFDL y en k), l), m) y n) RegCM-Ens.

4.2.6 Coeficiente hidrotérmico (HTC)

En la Fig. 42 se muestran los cambios del HTC con RegCM entre el futuro cercano y el periodo histórico con el escenario de bajas emisiones, los cuales podrían ser en general hasta de $-0.4 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$, dándose en toda la zona del altiplano central. En la región de las Californias los cambios podrían ser de $-0.1 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$. En el resto de las regiones de estudio los cambios son negativos. Los cambios entre el futuro lejano y el periodo histórico (Fig. 42b, f, j y n) son similares a los del futuro cercano, aunque en la simulación con el Reg-GFDL se podrían esperar cambios menores en la zona noroeste de México.

Con el escenario de altas emisiones los cambios con respecto al periodo histórico y el futuro cercano podrían ser similares a los de bajas emisiones (Fig. 42c, g, k y o), aunque en la simulación con Reg-GFDL (Fig. 42k) se puede ver que en el Golfo de México podría haber un cambio positivo. Con el escenario más extremo los cambios entre el futuro lejano y el periodo histórico son más notorios, pues en toda la región de estudio los cambios podrían ser negativos (de hasta $-0.4 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$)

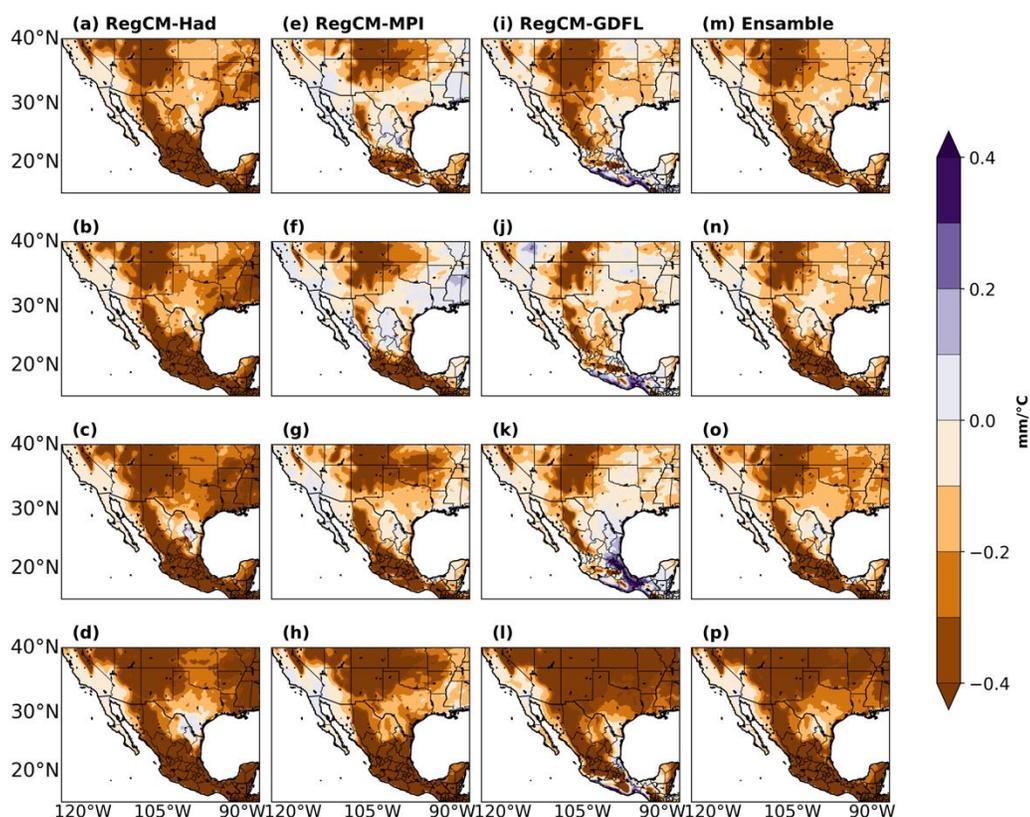


Figura 41. Delta de coeficiente hidrotérmico en la TC (HTC) con el escenario de bajas emisiones entre el futuro cercano y el periodo histórico en la primera fila, y entre el futuro lejano y el histórico en la segunda fila. Delta con el escenario de altas emisiones entre el futuro cercano y el histórico en la tercera fila; entre el futuro lejano y el histórico en la cuarta fila. En a), b), c) y d) son las simulaciones de RegCM-Had; en e), f), g) y h) RegCM-MPI; en i) y j) RegCM-GFDL y en k), l), m) y n) RegCM-Ens.

Los cambios del HTC con el RCA en el futuro cercano respecto al periodo histórico (Fig. 43a, e y m) con el escenario de bajas emisiones serían positivos en Baja California ($\sim 0.1 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$) y negativos en algunas partes de California, a diferencia del RegCM el cual mostró cambios ligeramente negativos (Fig. 43m). El resto del país podría presentar cambios negativos, sólo en algunas zonas de algunos estados del altiplano central podría haber cambios positivos y estos serían de $0.1 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$. Hacia finales del siglo XXI y con este mismo escenario, los cambios en las Californias de acuerdo con el ensamble (Fig. 49n) podrían ser

negativos ($-0.1 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$), algunas regiones podrían presentar cambios del orden de $0.1 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$ pero estas zonas son mínimas. El resto de las regiones presentarían cambios negativos de hasta $-0.4 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$, como es el caso del noreste (al sur de esta región).

En el futuro cercano bajo el escenario de altas emisiones (Fig. 43c, g, i y o) los cambios con respecto al periodo histórico podrían ser positivos en algunas zonas de Baja California; en la zona del altiplano central podrían ser entre negativos a nulos de acuerdo con el RCA-Ens (Fig. 43o). En el resto de las regiones los cambios podrían ser negativos, al igual que en el escenario de bajas emisiones. Hacia finales del siglo XXI, los cambios podrían llegar a ser de $-0.4 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$ en el altiplano central y norte, noreste, y en California; en algunas zonas de Baja California los cambios podrían ser de $\sim -0.1 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$ y en otras partes (hacia la costa) de $0.1 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$, esto de acuerdo con RCA-Ens (Fig. 43p). El RCA-GFDL, es interesante ver que muestra posibles cambios positivos en la región de Baja California (de hasta $\sim 0.2 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$) (Fig. 43j), a diferencia de la simulación con los otros dos modelos, que muestran en su mayoría cambios positivos.

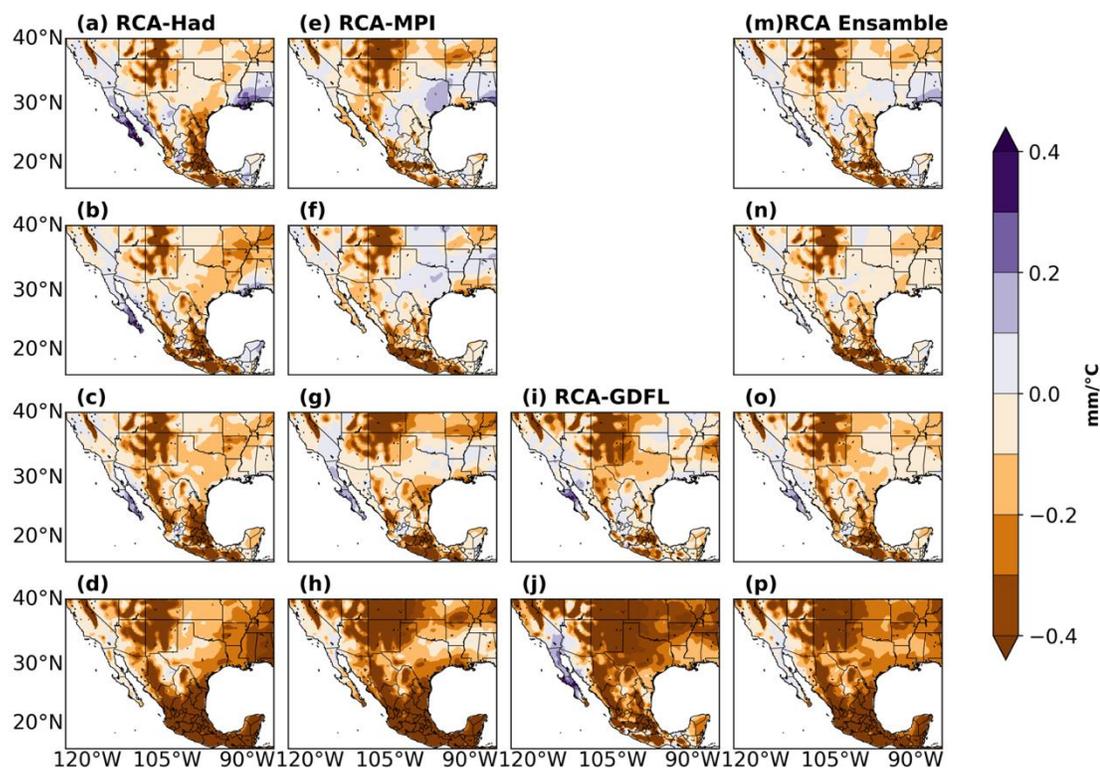


Figura 42. Delta de índice de coeficiente hidrotérmico en la TC (HTC) con el escenario de bajas emisiones entre el futuro cercano y el periodo histórico en la primera fila, y entre el futuro lejano y el histórico en la segunda fila. Con el escenario de altas emisiones en entre el futuro cercano y el histórico en la tercera fila; entre el futuro lejano y el histórico en la cuarta fila. En a), b), c) y d) son las simulaciones de RegCM-Had; en e), f), g) y h) RegCM-MPI; en i) y j) RegCM-GFDL y en k), l), m) y n) RegCM-Ens.

4.2.7 Frecuencia de regiones y área con aptitud vinícola

Recordemos que las simulaciones con RegCM en el periodo histórico fueron más calientes que las observaciones en la región vitivinícola más importante de México y Estados Unidos (Las Californias). Por lo tanto, la frecuencia de regiones vitícolas bajo el escenario de bajas emisiones con RegCM en el futuro cercano no muestra como áreas de aptitud a las Californias en ninguna de las simulaciones (Fig. 44). Solo el altiplano central y parte de Nuevo León, Chihuahua y una pequeña porción de California, EUA, muestran una frecuencia por arriba del 96%. Esto mismo se repite hacia finales del siglo XXI (Fig. 44b, f, j y n). Bajo el escenario de altas emisiones en el futuro cercano se repite el comportamiento del de bajas emisiones, mostrándose los mayores cambios hacia finales del siglo XXI, con una contracción significativa en el altiplano central e incluso en parte del sur de EUA y California, EUA (Fig. 44d, h, l y p). Por lo tanto, los posibles escenarios en el porcentaje de área de aptitud de acuerdo con los grados día con el RegCM son adecuados para el Altiplano, pero para las Californias es necesario hacer una corrección por sesgo.

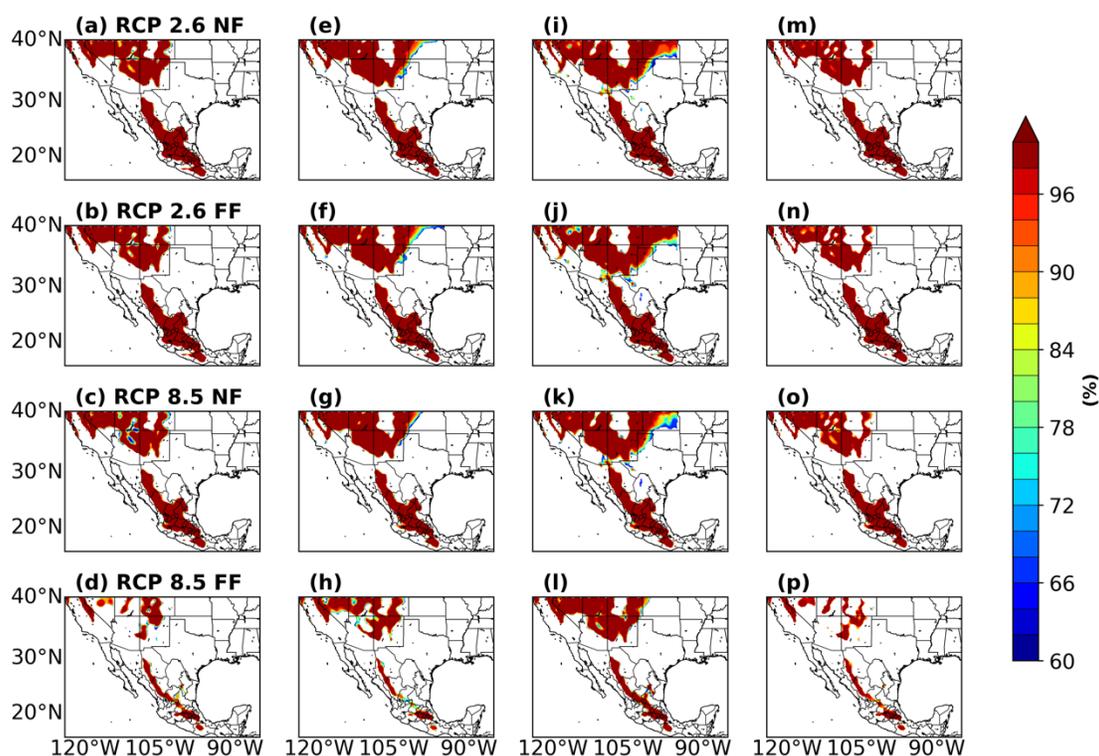


Figura 43. Frecuencia (en % de años) de condiciones vitivinícolas bajo el escenario de bajas emisiones en el futuro cercano (2021-2050) en la primera fila (a) y lejano en la segunda fila (e); y bajo el escenario de altas emisiones en el futuro cercano en la tercera fila (i) y en el futuro lejano en la cuarta fila (m). En a), b) c) y d) RegCM-Had. En e), f), g) y h) RegCM-MPI. En i), j), k) y l) RegCM-GFDL. En m), n), o) y p) RegCM-Ens.

Con el modelo RCA el comportamiento bajo el escenario de bajas emisiones es distinto al de RegCM, pues como puede verse en el futuro cercano toda la zona del altiplano central, parte de Baja California, Nuevo León, Coahuila y Chihuahua podrían seguir siendo aptas en todas las simulaciones, incluyendo el ensamble (Fig. 45d). Para el futuro lejano este comportamiento podría ser muy similar (Fig. 45e, f y h). Bajo el escenario de altas emisiones, en el futuro cercano la frecuencia sería similar a las del escenario de bajas, sólo que se puede ver que en la simulación con el MPI (Fig. 45j) tiene una menor frecuencia en Coahuila y Chihuahua, sin embargo, el ensamble (Fig. 45l) muestra estas zonas como posiblemente aptas con una frecuencia mayor al 96%. En el escenario más extremo, es decir hacia finales del siglo XXI podría ocurrir una reducción, desapareciendo la zona de Baja California y reduciéndose considerablemente la zona de California, EUA. El altiplano central también podría mostrar una considerable reducción según el modelo RCA-Had (Fig. 45m); sin embargo, con el ensamble (Fig. 45p) gran parte de esta región y el suroeste de Nuevo León podrían tener una frecuencia mayor al 96% con condiciones aptas para cultivar vid ($UC > 8500^{\circ}D$ y $UC < 2700^{\circ}D$). Esto se debe en parte a que las simulaciones históricas del RCA mostraron un sesgo frío en el altiplano.

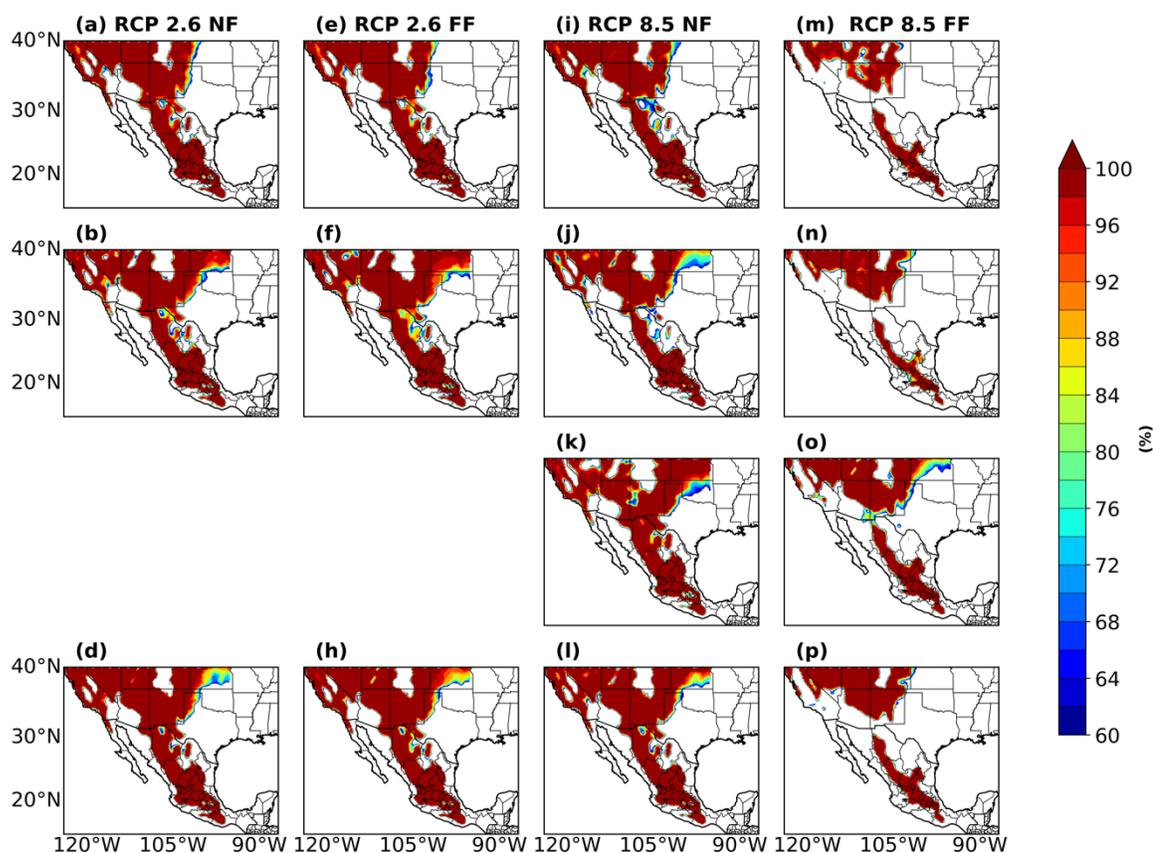


Figura 44. Frecuencia (en % de años) de condiciones vitivinícolas bajo el escenario de bajas emisiones en el futuro cercano (2021-2050) en la primera columna izquierda (a) y lejano en la segunda columna (e); y bajo el escenario de altas emisiones en el futuro cercano en la tercera columna (i) y en el futuro lejano en la columna derecha (m). En a), e) i) y m) RCA-Had. En b), f), j) y n) RCA-MPI. En c), g), k) y o) RCA-GFDL. En d), h), l) y p) RCA-Ens.

En la Tabla 6 se muestran los resultados del cambio en el área apta para los diferentes escenarios y periodos futuros relativos al periodo histórico mostrado en la Tabla 5. En general se puede ver que el área de RegCM podría disminuir hasta ~2.9% en el futuro cercano, con el escenario de bajas emisiones, mientras que en RCA podría haber un decremento de hasta 8.9%. Sólo en el escenario más extremo se confirma nuestra hipótesis de que el área de aptitud vitivinícola de acuerdo con las Unidades de Calor podría verse reducida considerablemente; a pesar de las diferencias opuestas en los sesgos históricos de los dos modelos se ve un acuerdo en los cambios de las áreas de aptitud, por ejemplo en el caso más extremo: el RegCM pasa de un 18.77% (periodo histórico, Tabla 5) a un 8.78% (RCP8.5 FF, Tabla 6) y el RCA pasa de un 24.84% (histórico, Tabla 5) a un 13.28% (RCP8.5FF, Tabla 6); para saber el porcentaje que representa este cambio en las áreas se utiliza la fórmula: $(A_{RCP8.5FF} - A_{Hist})/A_{Hist} * 100$, con esto se obtiene que podría haber una reducción del área hasta un 53.2% con RegCM y de un 46.5% con RCA (valores entre paréntesis en la Tabla 6).

Tabla 6. Porcentaje promedio y cambios en la cobertura de área con aptitud vitivinícola y desviaciones estándar de los ensambles de RegCM y RCA para México y Estados Unidos en el futuro cercano (NF: 2021-2050) y futuro lejano (FF: 2070-2099) de acuerdo a los escenarios de bajas (RCP2.6) y altas (RCP8.5) emisiones. Cambios (deltas) porcentuales relativos al período histórico de cada modelo.

Escenario	RegCM (delta %)	RCA (delta %)	Std RegCM	Std RCA
RCP2.6 NF	15.82 (-15.7)	22.62 (-8.9)	0.25	0.61
RCP2.6 FF	15.96 (-15)	22.74 (-8.4)	0.25	0.64
RCP8.5 NF	15.13 (-19.4)	22.40 (-9.8)	0.47	0.82
RCP8.5 FF	8.78 (-53.2)	13.28 (-46.5)	0.42	0.51

Capítulo 5. Discusión

En esta tesis se llevó a cabo una evaluación histórica y un análisis de escenarios de cambio climático de las principales regiones vitivinícolas de México (Baja California, Aguascalientes, Coahuila, Guanajuato, Querétaro y Zacatecas); también se incluyeron a Nuevo León (por tener características climáticas diferentes) y a Napa Valley en California por ser la región vitivinícola más importante de Estados Unidos. Se analizó un periodo de referencia (1981-2010) y los posibles cambios en dos periodos del siglo 21, un futuro cercano (2021-2050) y uno lejano (2070-2099). Los estados del altiplano central (conformados por Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro y Zacatecas), al igual que los de la región del altiplano norte (Coahuila) y la del noreste (Nuevo León) presentan un clima continental semiárido, con máximos de precipitación durante el verano en la temporada de crecimiento (TC) de la uva (de hasta ~500 mm) y disminuyendo hacia la temporada invernal. En las zonas del altiplano central y norte se presentan los máximos de temperatura entre mayo a julio, a mediados de la TC, lo que genera una acumulación de calor rápida en estas regiones. Por otro lado, la región de las Californias (Baja California y California) presenta un clima mediterráneo con mínimos de precipitación durante la TC (entre ~108.8 mm y 65.6 mm, de acuerdo a Livneh y CHIRPS, respectivamente) y máximos en la temporada invernal, haciéndola ideal para el cultivo de la vid, debido a que es menos propensa a formar enfermedades durante la TC (Cavazos et al., 2013; Valenzuela Solano et al., 2014); además, las temperaturas alcanzan sus máximos entre agosto y septiembre, que es casi a finales de la etapa de crecimiento, para luego descender nuevamente. En el noreste los máximos de temperatura se dan entre junio y septiembre, por lo cual en esta región la acumulación de calor se da de manera prematura y por tanto la TC finaliza antes que en las demás regiones.

Los dos modelos regionales reproducen de manera adecuada los valores interanuales de precipitación y dan una aproximación correcta del ciclo anual de temperatura; sin embargo, ambos modelos tienen sesgos importantes en el periodo histórico; el RegCM en general es más cálido que las observaciones en las Californias y es más húmedo que el RCA en el Altiplano. El RCA, aunque tiene sesgos menores de precipitación, muestra un patrón frío, especialmente en el Altiplano, y en las zonas con topografía compleja los dos modelos son más húmedos que las observaciones. Esto es consistente con trabajos previos donde también encuentran sesgos húmedos en las zonas montañosas con los modelos PRECIS, RegCM4 y RCA4 (Cavazos et al., 2020; Cerezo-Mota et al., 2016; Fuentes-Franco et al., 2015). Es por esto que técnicas como la corrección por sesgo pueden ayudar a ver de una manera más realista el comportamiento de estos modelos, especialmente en el caso de los escenarios futuros (Figs. 46 a 49).

De acuerdo con la corrección por sesgo del modelo RegCM bajo el escenario de bajas emisiones, la región de Baja California alcanzaría el umbral de T_{min} de 10°C en mayo y el de T_{max} de 22° a principios de abril en el futuro cercano. Este comportamiento es similar para el resto de las regiones estudiadas, a excepción de la región del noreste, donde, como se dijo anteriormente, la TC inicia antes que las demás (el umbral de T_{min} podría seguirse alcanzando a finales de febrero y principios de marzo), además bajo este escenario el umbral de T_{max} de 22°C podría alcanzarse en febrero. Bajo el escenario de altas emisiones y hacia finales del siglo XXI la TC en la región de BC podría verse adelantada, pues los umbrales de 10 y 22 °C podrían alcanzarse a inicios de abril y mediados de marzo, respectivamente (Fig. 47). En el resto de las regiones la TC podría verse adelanta hasta casi un mes, pues los umbrales se podrían alcanzar en marzo.

Con la corrección por sesgo del modelo RCA el comportamiento de las temperaturas y de la TC en la región de BC con el escenario de bajas emisiones, tanto en el futuro cercano como lejano podría ser similar al del histórico (Livneh) (Fig. 48), mientras que en el resto de los estados se vería adelantado por algunos días o medio mes aproximadamente. Bajo el escenario de altas emisiones el comportamiento es diferente, pues bajo el escenario más extremo en BC el umbral inferior de T_{min} podría alcanzarse en abril y el superior a finales de marzo. En el resto de las regiones este mismo umbral podría alcanzarse en marzo, a excepción de la región del noreste, donde éste se podría alcanzar entre enero y febrero. Todo esto implicaría una mayor acumulación de calor en la vid de manera más temprana y por tanto una mayor acumulación de azúcares, perdiendo de esta manera algunos tipos de uva la acidez para producir vinos de alta calidad como lo han sugerido algunos autores para otras regiones (Nemani et al., 2001; Schultz y Jones, 2010; White et al., 2006).

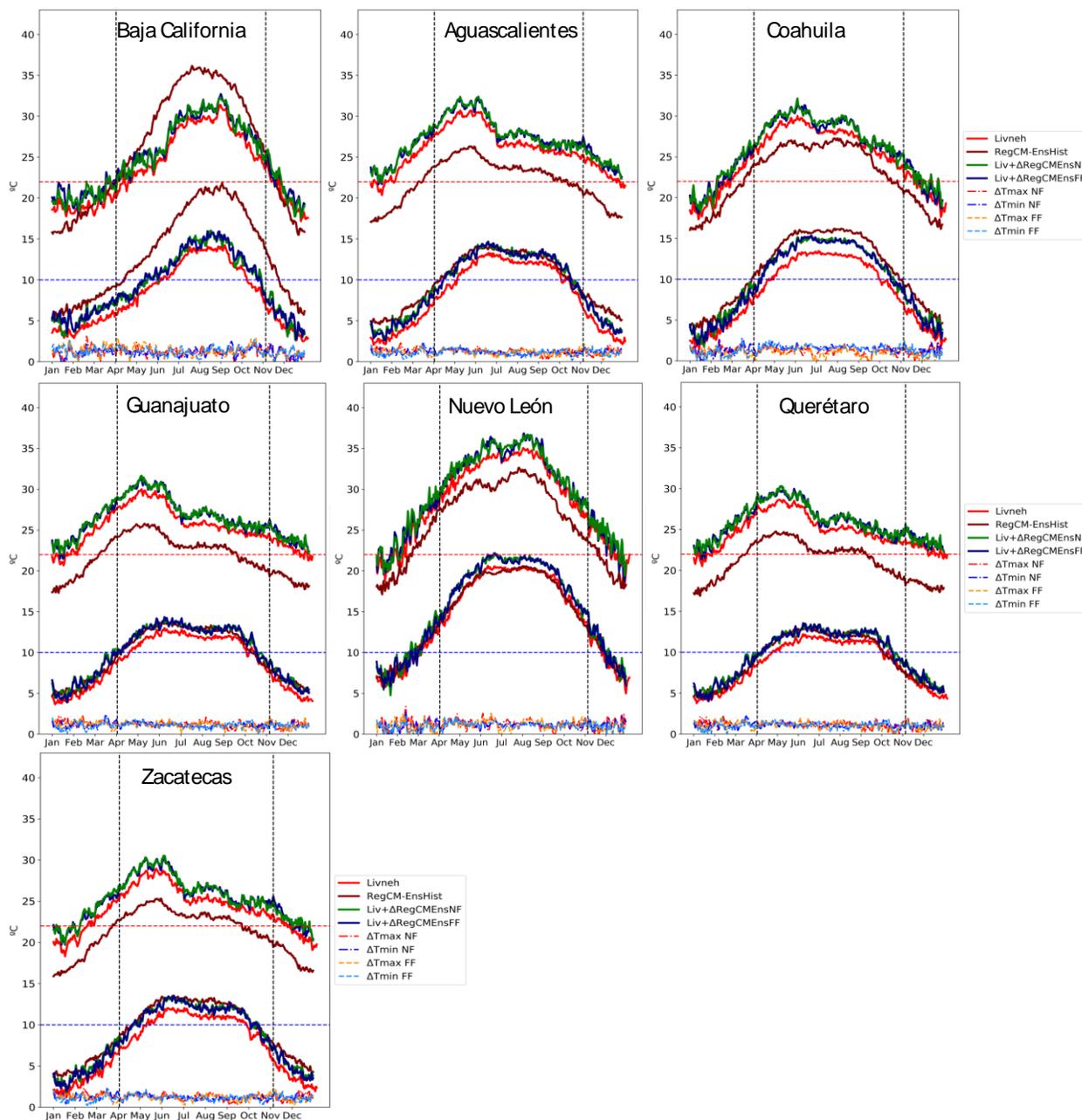


Figura 45. Climatologías diarias de Tmax y Tmin de las observaciones de Livneh, el ensamble del modelo regional RegCM para el periodo histórico (Hist: 1981-2010) y de la corrección por sesgo de RegCM (Liv+ Δ RegCMEns) para el futuro cercano (NF: 2021-2050) y futuro lejano (FF:2070-2099), bajo el escenario RCP2.6 de bajas emisiones en las regiones vitivinícolas de siete estados de México.

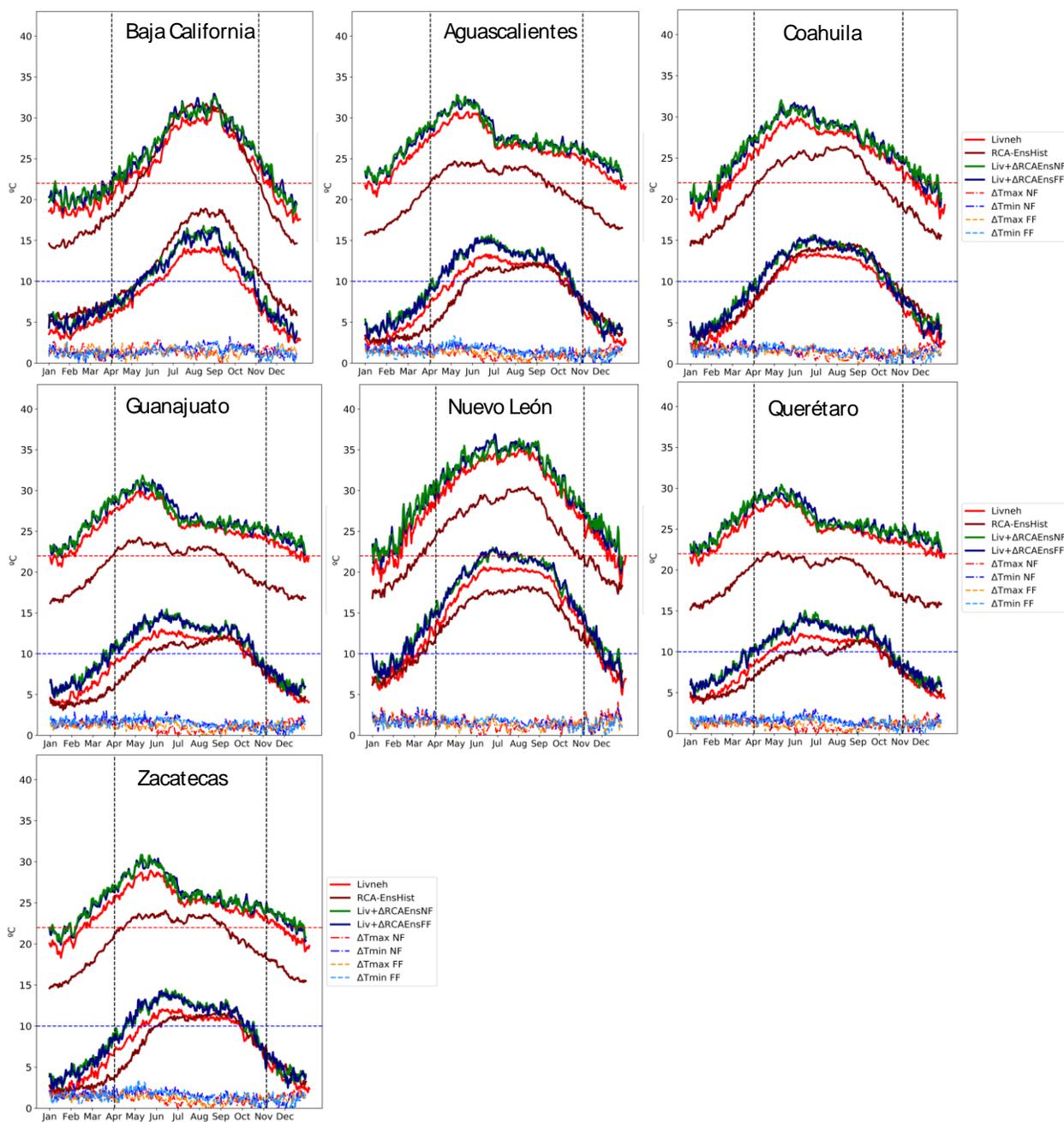


Figura 46. Como Fig. 46 pero para los escenarios de bajas emisiones de los ensambles y la corrección por sesgo del modelo regional RCA

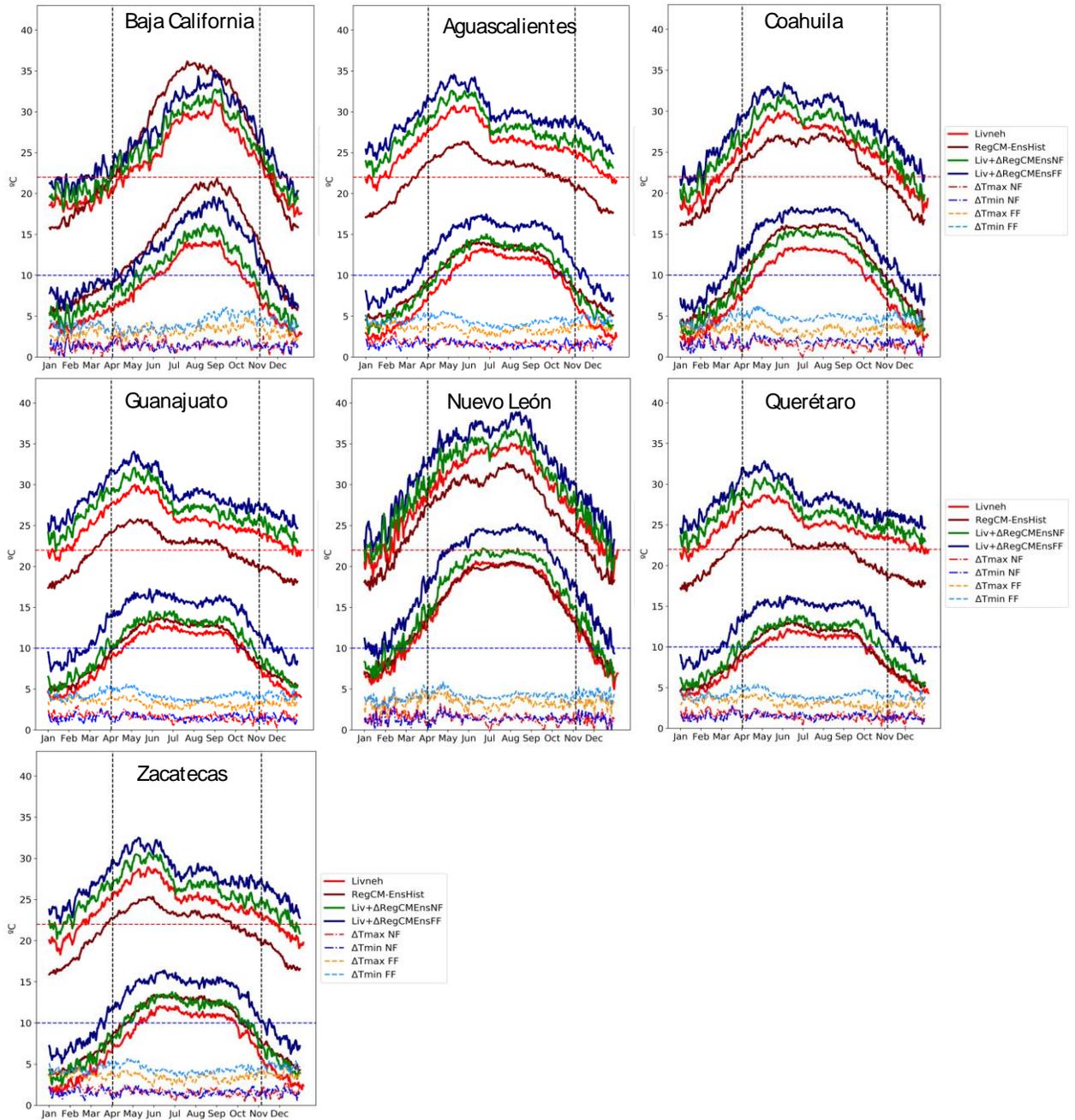


Figura 47. Como la Fig. 46 pero para la corrección por sesgo del escenario RCP8.5 de altas emisiones del RegCM

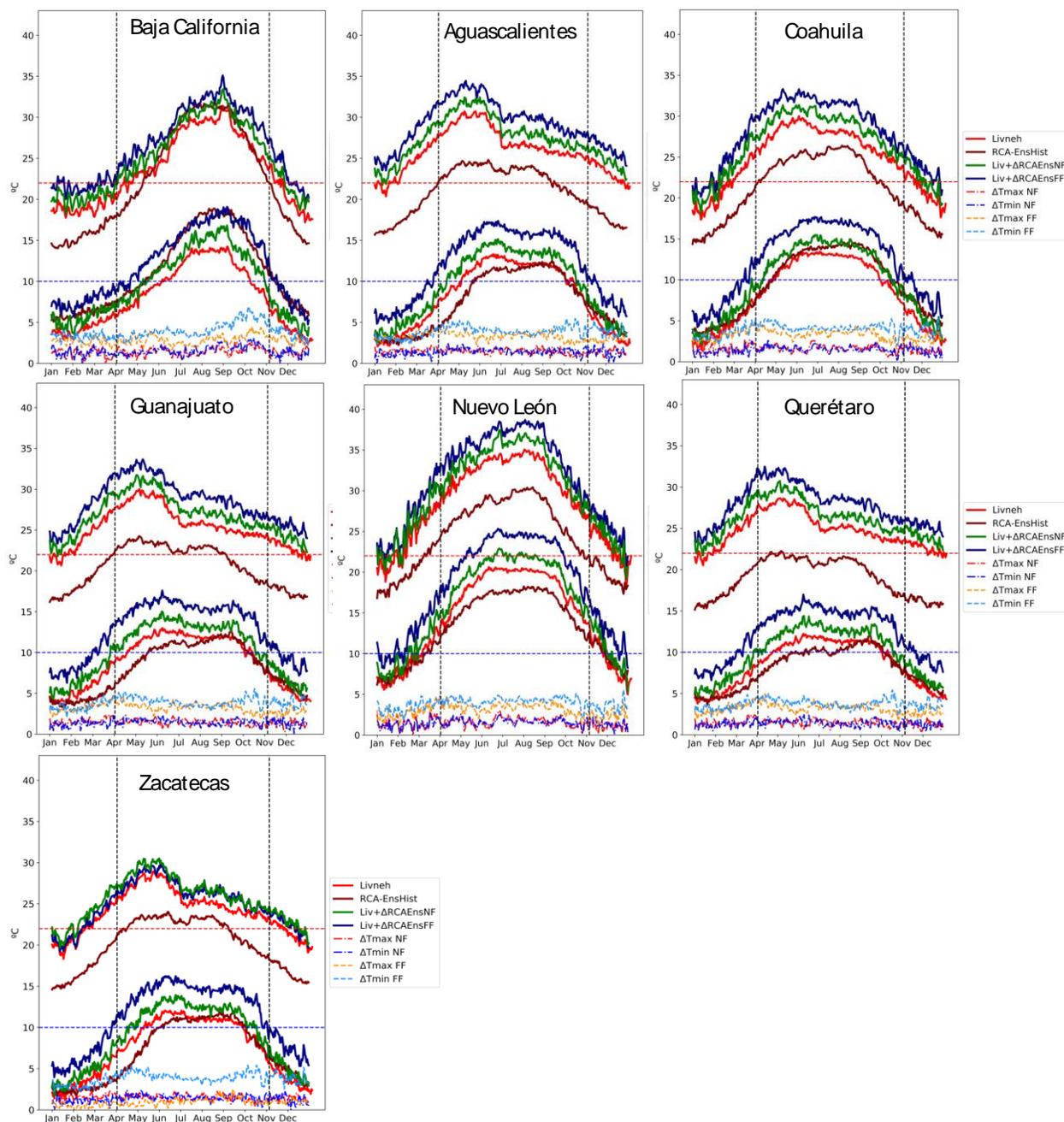


Figura 48. Como Fig. 47 pero para la corrección por sesgo del escenario de altas emisiones del RCA

Los resultados de los escenarios de cambio climático con dos modelos regionales (RegCM y RCA) sugieren que la temperatura podría incrementarse en toda la región de estudio (México y Estados Unidos), lo cual es consistente con trabajos previos usando GCMs (Colorado-Ruiz et al., 2018). En general, el cambio en la Tmax y la Tmin con el RegCM durante el siglo 21 en la TC podría variar entre 1.2 en el futuro cercano y hasta 4.3°C en el futuro lejano (Tabla 7). Los escenarios de cambio con el RCA son similares (entre 0.9 a

4.6°C; Tabla 8) durante el periodo de la TC en todas las regiones analizadas. Estos cambios repercutirían directamente en la Tmed y las UCs, lo que podría afectar al crecimiento de la vid ya que un aumento de la Tmin y de las UC implicaría una mayor acumulación de calor en las uvas.

Si se agregan los cambios de la Tmed de abril-octubre bajo el escenario RCP2.6 del futuro cercano con el RegCM en la Tabla 7 (con el RCA en la Tabla 8) a la Tmed de las observaciones de Livneh en la región de las Californias, por ejemplo, se podrían esperar valores futuros $\sim 19.7^{\circ}\text{C}$ (20.1°C) en RegCM (RCA). Estos valores promedio están en el límite de los climas calientes para la viticultura según Hélder Fraga et al., (2012). Además, las UCs podrían llegar a ser del orden de 2074.2°D (2169.2°D), mientras que para el futuro lejano con el escenario de altas emisiones las UCs podrían alcanzar los 2473.5°D (2600.1°D). Estos valores caen en los límites de la regiones vitivinícolas IV y V, según Amerine y Winkler, (1964) y Jones (2005), en donde se pueden cultivar variedades con mayor contenido de azúcar y con poca acidez, como por ejemplo Chardonay, Cabernet Franc, Merlot, Peverella, Colombard Francesa, Mission, Palomino, Verdelho, Carignane, Refosco, Trousseau y Tinta Madeira (Amerine y Winkler, 1964). Esto es consistente con el resultado de Cavazos et al. (2013), quienes reportan valores futuros de las UCs de 2400°D en Baja California, con simulaciones de un solo modelo global (el Had-GEM). En las otras regiones vitivinícolas de México se esperan aumentos de temperatura del mismo orden; sin embargo, en el altiplano central y el altiplano norte las UCs podrían a ser más altas, del orden de 2736.7°D y 2891.3°D bajo el escenario de altas emisiones y en el futuro lejano. Estos valores se pasan ligeramente del límite de 2700°D . Además, como se mostró en las Figs. 34 y 35 sólo una pequeña franja del altiplano (en las regiones más altas) podría seguir siendo apta para la vitivinicultura a finales del siglo 21 de acuerdo a las UCs, en donde se podrían seguir cultivando variedades como las que se mencionaron arriba.

Tabla 7. Observaciones de Livneh (OBS) y los cambios en el futuro de los principales índices calculados en las regiones vitivinícolas con el modelo RegCM para los dos escenarios (RCP2.6 y RCP8.5) y los dos periodos futuros (NF y FF).

Región	Tmax (°C) Abr-Oct	Tmin (°C) Abr-Oct	Tmed (°C) Abr-Oct	Prec (mm) Anual	GSP (mm) Abr-Oct	UC (°D) Abr-Oct	CI (°C) Sep
Las Californias: Baja California y California, EUA	OBS: 26.4 Deltas 2.6NF: 1.3 2.6 FF: 1.3 8.5 NF: 1.6 8.5 FF: 4.3	OBS: 10.6 Deltas 26NF: 1.2 2.6FF:1.3 8.5 NF: 1.5 8.5 FF: 4.1	OBS: 18.5 Deltas 26NF: 1.25 2.6FF:1.3 8.5 NF: 1.55 8.5 FF: 4.2	OBS: 607.7 Deltas 26NF: 0 2.6FF: 14.7 8.5 NF: 15.6 8.5 FF: 22.9	OBS: 108.8 Deltas 26NF: -4.5 2.6FF: 2.3 8.5 NF: -0.7 8.5 FF: 0.6	OBS: 1878.4 Deltas 26NF: 195.8 2.6FF: 208.6 8.5 NF: 239.1 8.5 FF: 595.1	OBS: 11.4 Deltas 26NF: 1.2 2.6FF: 1.4 8.5NF: 1.6 8.5 FF: 5.2
Altiplano Central: Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro y Zacatecas	OBS: 26.3 Deltas 2.6NF: 1.2 2.6 FF: 1.2 8.5 NF: 1.5 8.5 FF: 4.3	OBS: 10.7 Deltas 26NF: 1.1 2.6FF:1.1 8.5 NF: 1.5 8.5 FF: 4.3	OBS: 18.6 Deltas 26NF: 1.15 2.6FF: 1.15 8.5 NF: 1.5 8.5 FF: 4.3	OBS: 527.2 Deltas 26NF: -68.9 2.6FF: -63.5 8.5 NF: -80.4 8.5 FF: -217.8	OBS: 475.4 Deltas 26NF: -117.1 2.6FF: -99.96 8.5NF: -103.1 8.5FF: -212.1	OBS: 1874.3 Deltas 26NF: 239.9 2.6FF:235 8.5 NF: 314.1 8.5 FF: 892.6	OBS: 11.1 Deltas 26NF: 1.2 2.6FF: 1.2 8.5NF: 1.7 8.5 FF: 4.2
Altiplano Norte: Coahuila	OBS: 27.3 Deltas 2.6NF: 1.2 2.6 FF: 1.1 8.5 NF: 1.4 8.5 FF: 4.3	OBS: 11.4 Deltas 26NF: 1.2 2.6FF:1.1 8.5 NF: 1.5 8.5 FF: 4.5	OBS: 19.4 Deltas 26NF: 1.2 2.6FF: 1.1 8.5 NF: 1.45 8.5 FF: 4.4	OBS: 467.5 Deltas 26NF: -19.7 2.6FF: -18.7 8.5 NF: -0.6 8.5 FF: -108.3	OBS: 398.3 Deltas 26NF: -56.3 2.6FF: -58.7 8.5NF: -19.8 8.5FF: -98.1	OBS: 2045.1 Deltas 26NF: 235.4 2.6FF:222.6 8.5 NF: 283.7 8.5 FF: 823.7	OBS: 11.4 Deltas 26NF: 1 2.6FF: 0.9 8.5NF: 1.4 8.5 FF: 4.3
Noreste (NE): Nuevo León	OBS: 31.9 Deltas 2.6NF: 1.2 2.6 FF: 1.1 8.5 NF: 1.3 8.5 FF: 4.3	OBS: 18.2 Deltas 26NF: 1.2 2.6FF:1.2 8.5 NF: 1.5 8.5 FF: 4.3	OBS: 25.1 Deltas 26NF: 1.2 2.6FF: 1.1 8.5 NF: 1.4 8.5 FF: 4.3	OBS: 706.7 Deltas 26NF: 5.5 2.6FF: -13.6 8.5 NF: 46.4 8.5 FF: -94.8	OBS: 599.4 Deltas 26NF: -17.6 2.6FF: -43.2 8.5NF: 45.5 8.5FF: -48.9	OBS: 3107.3 Deltas 26NF: 212.9 2.6FF:210.4 8.5 NF: 243.1 8.5 FF: 684.9	OBS: 18.6 Deltas 26NF:-5.2 2.6FF: 1 8.5NF: 1.4 8.5 FF: 4.2

Tabla 8. Como Tabla 7, pero para el modelo RCA

Región	Tmax (°C) Abr-Oct	Tmin (°C) Abr-Oct	Tmed (°C) Abr-Oct	Prec (mm) Anual	GSP (mm) Abr-Oct	UC (°D) Abr-Oct	CI (°C) Sep
Las Californias: Baja California y California, EUA	Obs: 26.4	Obs: 10.6	Obs: 18.5	Obs: 607.7	Obs: 108.8	Obs: 1878.4	Obs: 11.4
	Deltas	Deltas	Deltas	Deltas	Deltas	Deltas	Deltas
	2.6NF: 1.5	26NF: 1.7	26NF: 1.6	26NF: 13.2	26NF: 9.2	26NF: 290.8	26NF: 1.5
	2.6 FF: 1.4	2.6FF:1.6	2.6FF:1.5	2.6FF: -29	2.6FF: -0.2	2.6FF: 266.7	2.6FF: 1.6
	8.5 NF: 1.5	8.5 NF:1.7	8.5 NF: 1.6	8.5 NF: 36.5	8.5 NF: 15.7	8.5 NF: 297.4	8.5 NF: 1.8
8.5 FF: 3.8	8.5 FF: 4.2	8.5 FF: 4	8.5 FF: 60.1	8.5 FF: 14.6	8.5 FF: 721.7	8.5 FF: 5.2	
Altiplano Central: Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro y Zacatecas	Obs: 26.3	Obs: 10.7	Obs: 18.6	Obs: 527.2	Obs: 475.4	Obs: 1874.3	Obs: 11.1
	Deltas	Deltas	Deltas	Deltas	Deltas	Deltas	Deltas
	2.6NF: 0.9	26NF: 1.6	26NF: 1.25	26NF: 130.5	26NF: 125.4	26NF:228.5	26NF: 1.3
	2.6 FF: 1	2.6FF:-1.7	2.6FF: 1.25	2.6FF: 134.3	2.6FF: 110.2	2.6FF:231.4	2.6FF: 1.2
	8.5 NF: 1.5	8.5 NF: 1.5	8.5 NF: 1.5	8.5 NF: 29.4	8.5NF: 37.2	8.5 NF: 286.8	8.5 NF: 1.5
8.5 FF: 4.6	8.5 FF: 4	8.5 FF: 4.3	8.5 FF: -58.1	8.5FF: -40.9	8.5 FF: 862.4	8.5 FF: 3.9	
Altiplano Norte: Coahuila	Obs: 27.3	Obs: 11.4	Obs: 19.4	Obs: 467.5	Obs: 398.3	Obs: 2045.1	Obs: 11.4
	Deltas	Deltas	Deltas	Deltas	Deltas	Deltas	Deltas
	2.6NF: 1.3	26NF: 1.5	26NF: 1.4	26NF: 23.7	26NF: 55.5	26NF:261.8	26NF: 1.3
	2.6 FF: 1.3	2.6FF: 1.5	2.6FF: 1.4	2.6FF: 48.3	2.6FF: 62.6	2.6FF:263.7	2.6FF: 1.3
	8.5 NF: 1.6	8.5 NF: 1.6	8.5 NF: 1.6	8.5 NF: -29.9	8.5NF: -3.2	8.5 NF: 314.5	8.5 NF: 1.7
8.5 FF: 4.5	8.5 FF: 4.2	8.5 FF: 4.3	8.5 FF: -62.2	8.5FF: -32	8.5 FF: 846.2	8.5 FF: 4.3	
Noreste (NE): Nuevo León	Obs: 31.9	Obs: 18.2	Obs: 25.1	Obs: 706.7	Obs: 599.4	Obs: 3107.3	Obs: 18.6
	Deltas	Deltas	Deltas	Deltas	Deltas	Deltas	Deltas
	2.6NF: 1.2	26NF: 1.5	26NF: 1.3	26NF: 19.1	26NF: 53.5	26NF:259	26NF: 1.5
	2.6 FF: 1.2	2.6FF:1.5	2.6FF: 1.3	2.6FF: 63.4	2.6FF: 83.2	2.6FF: 258.6	2.6FF: 1.5
	8.5 NF: 1.6	8.5 NF: 1.5	8.5 NF: 1.5	8.5 NF: -49	8.5NF: -21.9	8.5 NF: 307.5	8.5 NF: 1.8
8.5 FF: 4.5	8.5 FF: 4.2	8.5 FF: 4.3	8.5 FF:-130.7	8.5FF: -112.2	8.5 FF: 771.9	8.5 FF: 4.5	

En California, EUA, el comportamiento de las UCs podría ser similar al de Baja California, sólo que a diferencia de este último, en California podría haber una mayor región con posible potencial vitivinícola, ya que las UCs en la costa podrían ser entre 1600 y 2400°D; estos rangos forman parte de las regiones II, III y IV con capacidad de variedades como Pinot blanc, Sauvignon blanc, Cabernet Sauvignon, Grenache, Tannat, Semillon, Chenin blanc y todas las que se mencionaron anteriormente como parte de la zona de

Baja California. Los resultados de esta tesis son consistentes con los obtenidos por White et al. en 2006, quienes usaron el modelo RegCM3 con una corrección por sesgo para determinar las zonas que son aptas en EUA. Ellos obtienen una reducción del área de aptitud en la zona de California, así como una contracción de todas las zonas que eran aptas en el periodo histórico, confirmando nuestra hipótesis, ya que en el futuro lejano la región de California podría verse afectada por una menor frecuencia de años aptos para la viticultura en comparación con el periodo histórico, posiblemente debido a los aumentos de temperatura.

Como se mencionó anteriormente, los mayores aumentos de temperatura a escala diaria y mensual podrían ocurrir en la T_{min}, lo que significa que las noches podrían ser más cálidas en el futuro; esto se ve de manera clara en los escenarios del CI en las Tablas 7 y 8; las noches muy frías (<12°C) del mes de septiembre (al final de la temporada de crecimiento de la uva) se reducirían en la región de las Californias hacia finales del siglo 21 bajo el escenario de altas emisiones, e incluso en la región del altiplano central; en las zonas más altas podrían quedar solo noches templadas a frías (entre 15.3 y 15 °C), con lo cual la acidez en las variedades para vinos de alta gama se reduciría, al igual que los colores y el aroma (Tonietto y Carbonneau, 2004); esto es consistente con trabajos previos (Cavazos et al., 2013; Firth et al., 2017; Jones, 2007a; White et al., 2006).

Además de la temperatura, otra de las variables que podría cambiar en la región de estudio es la precipitación; los escenarios sugieren una disminución especialmente en la zona del altiplano central hacia finales del siglo 21 y bajo el escenario de altas emisiones. Los cambios podrían ser de hasta -217.8 mm, pero esta reducción tal vez no afectaría a la vid, ya que durante el verano del periodo histórico llueve más de lo que necesitan los viñedos en la zona del altiplano; los valores esperados del índice hidrotérmico, HTC, para esta región serían entre 1 a 1.5 mm/°C, los cuales son ideales para cultivar la vid.

Por el contrario, en Baja California la precipitación de acuerdo con RegCM y con RCA podría tener un incremento durante la TC (2.3 mm en el RCP2.6 NF), mientras que en la temporada invernal podría haber una disminución muy pequeña bajo el escenario de bajas emisiones en el futuro cercano y lejano. Esto es consistente con lo obtenido por Cavazos et al., 2013 para la TC, ya que según el modelo global HadGEM la precipitación podría aumentar ligeramente en la zona vitivinícola de Baja California, lo que podría afectar negativamente debido a un posible aumento de plagas.

Es posible que bajo el escenario más extremo (RCP8.5) en el futuro lejano con RegCM (RCA) haya un cambio en el área apta para cultivar la vid con respecto a la superficie del país de -9.9 (-11.5) puntos

porcentuales con respecto al periodo histórico, lo que representa una reducción de la superficie apta de ~46 con RCA y un 53% con RegCM, pero con el escenario de bajas emisiones la reducción no sería tan drástica. Esto puede deberse a que bajo el RCP2.6 primero se da un nivel máximo de forzamiento de $3\text{W}/\text{m}^2$ a mediados de siglo, seguida de una disminución de $2.6\text{W}/\text{m}^2$ para el 2100 (Nazarenko et al., 2015; van Vuuren et al., 2011). Además, las zonas que quedarían como posiblemente aptas son las Californias y los lugares con una altitud mayor (en el caso de México y también de EUA) o hacia el norte (EUA); esto es consistente con diversos estudios (Firth et al., 2017; Hannah et al., 2013; Jones, 2007a; Pongr, 2014; White et al., 2006) en los cuales se presenta una significativa reducción de las zonas vitícolas de EUA, y del mundo, con lo cual nuestra hipótesis se confirma.

Capítulo 6. Conclusiones

Se analizaron diferentes variables climáticas que son importantes para el desarrollo de la uva industrial en las principales zonas vitivinícolas de México y en el norte de California que se caracterizan por tener climas mediterráneos y semiáridos. La pregunta científica que se investigó fue: ¿Qué tanto podrían cambiar las características climáticas y la aptitud para la viticultura en estas regiones bajo dos escenarios de cambio climático en dos periodos futuros del siglo 21?

A partir de la evaluación de los modelos climáticos regionales RegCM y RCA se encontró que ambos lograron reproducir de forma realista el ciclo estacional de las temperaturas en las regiones vitivinícolas, pero con algunos sesgos; el RegCM sobrestimó la temperatura del periodo de crecimiento de la uva en Baja California y California, principales productores de uva y vinos en México y Estados Unidos, respectivamente. Por el contrario, el RCA tuvo un sesgo frío en todo el Altiplano y simuló mejor la precipitación que el RegCM; por lo tanto, las variables derivadas de la precipitación y temperatura, como el índice hidrotérmico (HTC) tuvieron un mejor comportamiento con el RCA. En general RegCM es más húmedo en el Altiplano central, mientras que RCA es más húmedo en las zonas montañosas de la Sierra Madre Oriental y Occidental, incluso en las zonas montañosas de Baja California y California.

Además se encontró que los cambios esperados en el siglo 21 bajo el escenario de bajas emisiones son pequeños. Los cambios más relevantes podrían ocurrir bajo el escenario de altas emisiones y a finales de siglo de acuerdo con ambos modelos, especialmente la temperatura mínima podría incrementarse más que la temperatura máxima en algunas regiones. Por ejemplo, el RegCM muestra un cambio de Tmin de hasta 4.5°C durante la TC en el Altiplano norte, mientras que RCA muestra este cambio en la región de las Californias llegando a ser de hasta 4.2 °C. Con esto el índice de noches frías de septiembre, el CI, se vería afectado durante el futuro habiendo noches templadas a cálidas hacia finales de septiembre en regiones del Altiplano central y noches cálidas en el resto de las regiones de estudio. Esto último podría afectar el aroma y color de la uva, además se tendrían que cultivar variedades que puedan desarrollarse bajo temperaturas más altas.

Los mayores cambios en la precipitación podrían presentarse durante el verano con el escenario de bajas emisiones en el futuro cercano y lejano; este escenario es el que presenta mayor incertidumbre porque el RegCM sugiere una disminución, mientras que el RCA sugiere un aumento de precipitación tanto en el verano como en la temporada invernal. Con el escenario de altas emisiones los dos modelos sugieren cambios en la misma dirección; en el verano podría haber una disminución de precipitación en casi todos

los estados vitivinícolas, excepto en Baja California. La precipitación invernal podría incrementarse ligeramente en casi todas las regiones estudiadas. Es posible que la reducción de precipitación (~18.75%) de verano que sugieren los escenarios para el Altiplano no afecte demasiado a la viticultura de esa región durante el siglo 21, ya que históricamente llueve más de lo que necesitan los viñedos durante la temporada de crecimiento.

La temporada de crecimiento (TC) es posible se vea adelantada de manera general, entre medio mes a un mes en casi todas las regiones de estudio, ya que el umbral inicial de 10°C de la T_{min} podría alcanzarse antes debido a los aumentos generalizados de temperatura. En el escenario de altas emisiones y en el futuro lejano la T_{max} podría alcanzar valores promedio durante la TC mayores a los 22°C en casi todas las regiones de estudio. Esto implicaría una acumulación de calor prematura y mayor, por lo que es posible que las vides más resistentes a las altas temperaturas (Figura 3) como la Sangiovese, Grenache, Carignane, Zinfandel, la Nebbiolo, Cabernet Sauvignon, uva pasa y la uva de mesa serían aptas bajo este escenario, o que se tengan que tomar medidas de adaptación, como la hibridación de vides que sean capaces de adaptarse a mayores temperaturas.

En general podría haber una reducción del área apta para la vitivinicultura (según las unidades de calor) hacia finales del siglo 21 con el escenario de altas emisiones (de -49.6% con la corrección por sesgo de RegCM y de -46.5% con RCA), quedando como más adecuadas las zonas altas del altiplano central y algunas zonas de las Californias. Esta reducción podría deberse más a los mayores aumentos de T_{min} que de la T_{max} como lo sugiere este escenario extremo.

Por lo tanto, a pesar de que los dos modelos climáticos regionales reprodujeron las principales características del clima de la región de estudio, ambos presentaron sesgos importantes en temperatura y precipitación. Por ello, técnicas como la corrección por sesgo ayudaron a determinar si la señal del cambio climático en estos modelos es consistente. Lo que encontramos es que los rangos de los cambios de temperatura son muy similares en los dos modelos (ΔT_{med} de hasta 4.4 y 4.3°C con RegCM y RCA, respectivamente). En el caso de la precipitación, la mayor consistencia entre los dos modelos fue con el escenario de altas emisiones, donde se presenta una disminución en las regiones del altiplano central y norte y en el noreste, mientras que en las Californias podría haber un ligero incremento en el verano. Esto confirma que las características climáticas podrían cambiar en el futuro en la región de este estudio.

Como trabajo futuro se analizará el ensamble de ambos modelos para ver si de esta manera el comportamiento de variables como la precipitación o la temperatura máxima mejoran respecto a las

observaciones. Así mismo se planea también analizar estos índices con otro modelo climático regional como el REMO2015, para ver el comportamiento con tres modelos diferentes y así tratar de disminuir la incertidumbre de los escenarios futuros.

Literatura citada

- Allen, J. C. 1976. A modified sine wave method for calculating degree days. *Environmental Entomology*, 5(6), 388–396. doi:10.1093/ee/5.3.388
- Amerine, M. A., Winkler, A. J. 1964. Composition and Quality of Musts and Wines of California Grapes. *Hilgardia*, 15(6), 493–675. doi:10.3733/hilg.v15n06p493
- Anderson, K. 2013. HUGH JOHNSON and JANCIS ROBINSON: The World Atlas of Wine, 7th edition. Mitchell Beazley, London, 2013, 400 pp., ISBN 978-1-845-33689-9, \$55 (cloth). *Journal of Wine Economics*, 8(3), 359–360. doi:10.1017/jwe.2013.39
- Baskerville, G. L., Emin, P. 1969. Rapid Estimation of Heat Accumulation from Maximum and Minimum Temperatures. *Ecology*, 50(3), 514–517. doi:10.2307/1933912
- Blanco Ward, D., Monteiro, A., Lopes, M., Borrego, C., Silveira, C., Viceto, C., Rocha, A., Ribeiro, A., Andrade, J., Feliciano, M., Castro, J., Barreales, D., Neto, J., Carlos, C., Peixoto, C., Miranda, A. 2019. Climate change impact on a wine-producing region using a dynamical downscaling approach: Climate parameters, bioclimatic indices and extreme indices. *International Journal of Climatology*, 1–20. doi:10.1002/joc.6185
- Bodenstedt, A. 2010. Guía de Vinos Mexicanos. En *Art Boden: México*.
- Cabré, M. F., Quénol, H., Nuñez, M. 2016. Regional climate change scenarios applied to viticultural zoning in Mendoza, Argentina. *International Journal of Biometeorology*, 60(9), 1325–1340. doi:10.1007/s00484-015-1126-3
- Cavazos, T. 2013. Vitivinicultura en los Valles de Baja California : Medio ambiente , cambio climático y sociedad.
- Cavazos, T., Arriaga-Ramírez, S. 2012. Downscaled climate change scenarios for Baja California and the North American monsoon during the twenty-first century. *Journal of Climate*, 25(17), 5904–5915. doi:10.1175/JCLI-D-11-00425.1
- Cavazos, T., Lizárraga-Partida, M. L., Kretschmar, T., Hernandez, R., Pavía, E., Valenzuela, E., Rodríguez, V. M., Rete, A., Figueroa, Y., Espinoza, B. 2013. Vitivinicultura en los Valles de Baja California : Medio ambiente , cambio climático y sociedad. Ensenada, B.C.
- Cavazos, T., Luna-Niño, R., Cerezo-Mota, R., Fuentes-Franco, R., Méndez, M., Pineda Martínez, L. F., Valenzuela, E. 2020. Climatic trends and regional climate models intercomparison over the CORDEX-CAM (Central America, Caribbean, and Mexico) domain. *International Journal of Climatology*, 40(3), 1396–1420. doi:10.1002/joc.6276
- Cavazos, T., Salinas, J. A., Martínez, B., Colorado, G., de Grau, P., Prieto-González, R., Bravo, M. E. 2013. Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional. En informe, México, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- Cerezo-Mota, R., Cavazos, T., Arritt, R., Torres-Alavez, A., Sieck, K., Nikulin, G., Moufouma-Okia, W., Salinas-Prieto, J. A. 2016. CORDEX-NA: Factors inducing dry/wet years on the North American Monsoon region. *International Journal of Climatology*, 36(2), 824–836. doi:10.1002/joc.4385
- Colorado-Ruiz, G., Cavazos, T., Salinas, J. A., De Grau, P., Ayala, R. 2018. Climate change projections from

Coupled Model Intercomparison Project phase 5 multi-model weighted ensembles for Mexico, the North American monsoon, and the mid-summer drought region. *International Journal of Climatology*, 38(15), 5699–5716. doi:10.1002/joc.5773

- Conde, C., Ferrer, R. M., Liverman, D. 1999. Estudio de la vulnerabilidad de maíz de temporal mediante el modelo CERES-maize. Gay Carlos (comp.), México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México, México, Instituto Nacional de Ecología, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.
- Cook, B. I., Smerdon, J. E., Seager, R., Coats, S. 2014. Global warming and 21 st century drying. *Climate Dynamics*, 43(9–10), 2607–2627. doi:10.1007/s00382-014-2075-y
- Dunne, J. P., John, J. G., Adcroft, A. J., Griffies, S. M., Hallberg, R. W., Shevliakova, E., Stouffer, R. J., Cooke, W., Dunne, K. A., Harrison, M. J., Krasting, J. P., Malyshev, S. L., Milly, P. C. D., Philipps, P. J., Sentman, L. T., Samuels, B. L., Spelman, M. J., Winton, M., ... Zadeh, N. 2012. GFDL's ESM2 global coupled climate-carbon earth system models. Part I: Physical formulation and baseline simulation characteristics. *Journal of Climate*, 25(19), 6646–6665. doi:10.1175/JCLI-D-11-00560.1
- Faesler, C. 2003. *The Wines of Mexico, roots, shoots and fruits* (1a ed.). REVIMUNDO MEXICO.
- Firth, R., Kala, J., Lyons, T. J., Andrys, J. 2017. An analysis of regional climate simulations for Western Australia's wine regions-model evaluation and future climate projections. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(7), 2113–2138. doi:10.1175/JAMC-D-16-0333.1
- Fraga, H., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J., Santos, J. A. 2013. Future scenarios for viticultural zoning in Europe: Ensemble projections and uncertainties. *International Journal of Biometeorology*, 57(6), 909–925. doi:10.1007/s00484-012-0617-8
- Fraga, Hélder, Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J., Santos, J. A. 2012. An overview of climate change impacts on European viticulture. *Food and Energy Security*, 1(2), 94–110. doi:10.1002/fes3.14
- Fuentes-Franco, R., Coppola, E., Giorgi, F., Graef, F., Pavia, E. G. 2014. Assessment of RegCM4 simulated inter-annual variability and daily-scale statistics of temperature and precipitation over Mexico. *Climate Dynamics*, 42(3–4), 629–647. doi:10.1007/s00382-013-1686-z
- Fuentes-Franco, R., Coppola, E., Giorgi, F., Pavia, E. G., Diro, G. T., Graef, F. 2015. Inter-annual variability of precipitation over Southern Mexico and Central America and its relationship to sea surface temperature from a set of future projections from CMIP5 GCMs and RegCM4 CORDEX simulations. *Climate Dynamics*, 45(1–2), 425–440. doi:10.1007/s00382-014-2258-6
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., others. 2015. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific data*, 2, 150066.
- Gay, C., Estrada, F., Conde, C., Eakin, H., Villers, L. 2006. Potential impacts of climate change on agriculture: A case of study of coffee production in Veracruz, Mexico. *Climatic Change*, 79(3–4), 259–288. doi:10.1007/s10584-006-9066-x
- Giorgi, F., Coppola, E., Solmon, F., Mariotti, L., Sylla, M. B., Bi, X., Elguindi, N., Diro, G. T., Nair, V., Giuliani, G., Turuncoglu, U. U., Cozzini, S., Güttler, I., O'Brien, T. A., Tawfik, A. B., Shalaby, A., Zakey, A. S., Steiner, A. L., ... Brankovic, C. 2012. RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Research*, 52(1), 7–29. doi:10.3354/cr01018
- Gladstones, J. 2011. *Wine, terroir and climate change*. Wakefield Press.
- Greer, D. H., Weedon, M. M. 2013. The impact of high temperatures on *Vitis vinifera* cv. semillon grapevine

- performance and berry ripening. *Frontiers in Plant Science*, 4(DEC), 1–9. doi:10.3389/fpls.2013.00491
- Hannah, L., Roehrdanz, P. R., Ikegami, M., Shepard, A. V., Shaw, M. R., Tabor, G., Zhi, L., Marquet, P. A., Hijmans, R. J. 2013. Climate change, wine, and conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(17), 6907–6912. doi:10.1073/pnas.1210127110
- Hoegh-Guldberg, O., Jacob, D., Taylor, M., Bindi, M., Brown, S., Camilloni, I., Diedhiou, A., Djalante, R., Ebi, K. L., Engelbrecht, F., others. 2018. Impacts of 1.5 °C global warming on natural and human systems,[in:] *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. En The Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty.*
- Jones, G. V. 2007a. Climate Change: observations, projections and general implications for viticulture and wine production. *Vasa*, (January 2007), 17. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- Jones, G. V., Duff, A. A., Hall, A., Myers, J. W. 2010. Spatial analysis of climate in winegrape growing regions in the western United States. *American Journal of Enology and Viticulture*, 61(3), 313–326.
- Jones, G. V., White, M. A., Cooper, O. R., Storchmann, K. 2005. Climate change and global wine quality. *Climatic Change*, 73(3), 319–343. doi:10.1007/s10584-005-4704-2
- Jones, G. V. 2007b. Climate change: Observations, projections, and general implications for viticulture and wine production. *Zaragoza (E)*, 1–13. de <https://www.infowine.com/intranet/libretti/libretto4594-01-1.pdf>
- Livneh, B., Bohn, T. J., Pierce, D. W., Munoz-Arriola, F., Nijssen, B., Vose, R., Cayan, D. R., Brekke, L. 2015. A spatially comprehensive, hydrometeorological data set for Mexico, the U.S., and Southern Canada 1950-2013. *Scientific Data*, 2, 1–12. doi:10.1038/sdata.2015.42
- Mesterházy, I., Mészáros, R., Pongrácz, R. 2014. The effects of climate change on grape production in Hungary. *Időjárás*, 118(3), 193–206.
- Müller, W. A., Jungclaus, J. H., Mauritsen, T., Baehr, J., Bittner, M., Budich, R., Bunzel, F., Esch, M., Ghosh, R., Haak, H., Ilyina, T., Kleine, T., Kornblueh, L., Li, H., Modali, K., Notz, D., Pohlmann, H., Roeckner, E., ... Marotzke, J. 2018. A Higher-resolution Version of the Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM1.2-HR). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 10(7), 1383–1413. doi:10.1029/2017MS001217
- Nazarenko, L., Tan, Z., Zhuang, Q., Walter Anthony, K., Wang, M., Larson, V. E., Ghan, S. J. 2015. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 6, 513–526. doi:10.1002/2014MS000403.Received
- Nemani, R. R., White, M. A., Cayan, D. R., Jones, G. V., Running, S. W., Coughlan, J. C., Peterson, D. L. 2001. Asymmetric warming over coastal California and its impact on the premium wine industry. *Climate Research*, 19(1), 25–34. doi:10.3354/cr019025
- Pongr, R. 2014. *Id ő járás*. 118(3), 193–206.
- Rueda-Magaña, V. O., Gay-García, C. 2002. Vulnerabilidad y adaptación regional ante el cambio climático y sus impactos ambientales, sociales y económicos. *Gaceta Ecológica*, 65(octubre-diciembre), 7–23. de <http://www.redalyc.org/pdf/539/53906501.pdf>
- Ruml, M., Vuković, A., Vujadinović, M., Djurdjević, V., Ranković-Vasić, Z., Atanacković, Z., Sivčev, B.,

- Marković, N., Matijašević, S., Petrović, N. 2012. On the use of regional climate models: Implications of climate change for viticulture in Serbia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 158–159, 53–62. doi:10.1016/j.agrformet.2012.02.004
- SAGARPA. 2018. Atlas Agroalimentario 2012-2018. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), 1, 1–222. doi:10.1111/resp.12002
- SAGARPA-CONSEJO MEXICANO VITIVINICOLA. 2018. Comité Nacional del Sistema Producto Ovinos. Causas de eliminación en el rebaño ovino, 123–134.
- Schultz, H. R., Jones, G. V. 2010. Climate induced historic and future changes in viticulture. *Journal of Wine Research*, 21(2), 137–145. doi:10.1080/09571264.2010.530098
- Svoboda, M., Fuchs, B. 2017. Handbook of Drought Indicators and Indices*. doi:10.1201/9781315265551-12
- Tiefenbacher, J. P., Townsend, C. 2019. The semiofoodscape of wine: The changing global landscape of wine culture and the language of making, selling, and drinking wine. En *Handbook of the Changing World Language Map* (Vol. 1). doi:10.1007/978-3-030-02438-3_213
- Tonietto, J., Carbonneau, A. 2004. A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124(1–2), 81–97. doi:10.1016/j.agrformet.2003.06.001
- Torres-Alavez, A., Cavazos, T., Turrent, C. 2014. Land-sea thermal contrast and intensity of the North American monsoon under climate change conditions. *Journal of Climate*, 27(12), 4566–4580. doi:10.1175/JCLI-D-13-00557.1
- Valenzuela Solano, C., Ruiz Corral, J. A., Ramírez Ojeda, G., Hernández Martínez, R. 2014. Efectos del cambio climático sobre el potencial vitícola de Baja California, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (10), 2047–2059. doi:10.29312/remexca.v0i10.1043
- van Leeuwen, C., Schultz, H. R., Garcia de Cortazar-Atauri, I., Duchene, E., Ollat, N., Pieri, P., Bois, B., Goutouly, J.-P., Quenol, H., Touzard, J.-M., Malheiro, A. C., Bavaresco, L., Delrot, S. 2013. Why climate change will not dramatically decrease viticultural suitability in main wine-producing areas by 2050. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(33), E3051–E3052. doi:10.1073/pnas.1307927110
- van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J. F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., Rose, S. K. 2011. The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109(1), 5–31. doi:10.1007/s10584-011-0148-z
- Viers, J. H., Williams, J. N., Nicholas, K. A., Barbosa, O., Kotzé, I., Spence, L., Webb, L. B., Merenlender, A., Reynolds, M. 2013. Vinecology: Pairing wine with nature. *Conservation Letters*, 6(5), 287–299. doi:10.1111/conl.12011
- Webb, L. B., Whetton, P. H., Bhend, J., Darbyshire, R., Briggs, P. R., Barlow, E. W. R. 2012. Earlier wine-grape ripening driven by climatic warming and drying and management practices. *Nature Climate Change*, 2(4), 259–264. doi:10.1038/nclimate1417
- White, M. A., Diffenbaugh, N. S., Jones, G. V., Pal, J. S., Giorgi, F. 2006. Extreme heat reduces and shifts United States premium wine production in the 21st century. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(30), 11217–11222. doi:10.1073/pnas.0603230103